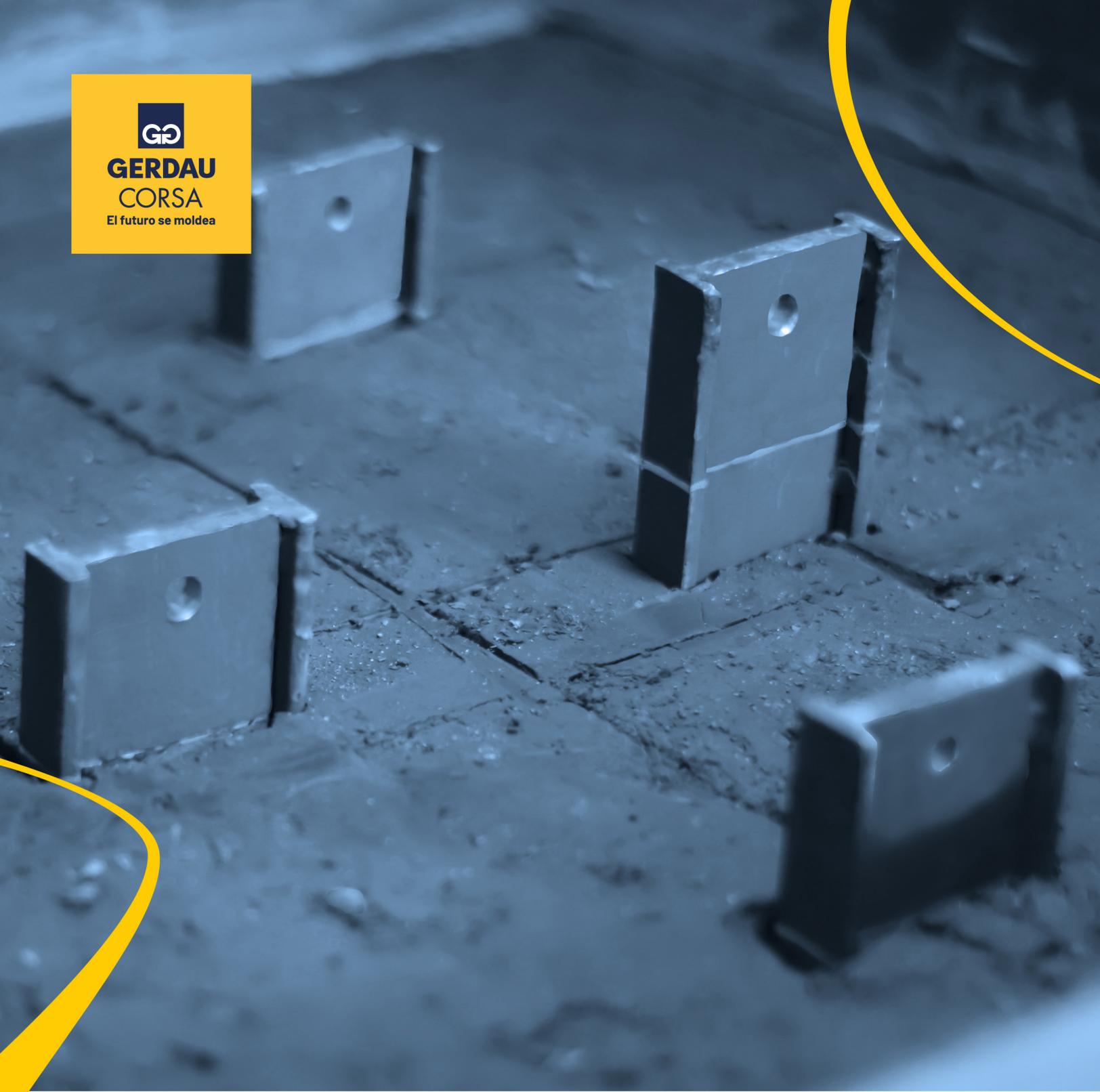




GERDAU
CORSA
El futuro se moldea



MODELOS A ESCALA DE PILOTES DE ACERO

TIPO IR BAJO CARGA AXIAL

Francisco A. Flores López
Janeth B. Ramos de Lara
Rigoberto Torres Villeda

Gerdau Corsa. El futuro se moldea.





CONTENIDO

Resumen

1. Introducción

1.1 Modelos a escala

2. Elementos empleados para las pruebas de carga axial

2.1 Pilotes de acero

2.2 Contenedores de suelo

2.3 Descripción del suelo

2.4 Marco de carga y sistema de medición de carga y lectura de desplazamientos

3. Pruebas de carga axial

3.1 Hincado de pilotes

3.2 Ejecución de pruebas y resultados

4. Pruebas en compresión

4.1 Pilotes W24x55 a compresión

4.2 Pilotes W18x35 a compresión

4.3 Pilotes W10x17 a compresión

4.4 Pilotes a tensión

5. Conclusiones

6. Referencias

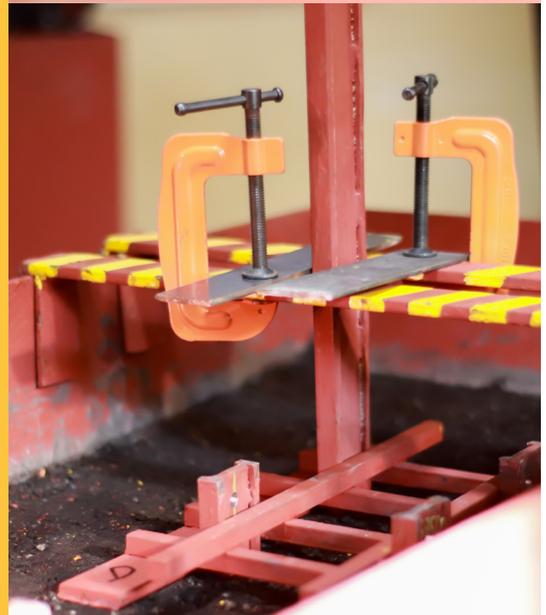
RESUMEN

La necesidad de contar con un conocimiento más profundo en el uso de perfiles de acero tipo IR o H como elementos de cimentación en suelos del territorio nacional, más aún, en la Ciudad de México donde hemos mostrado su aplicabilidad para recimentar 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.

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.

En muchas circunstancias, los modelos a escala pueden ofrecer alternativas más económicas que los correspondientes modelos a escala real. Adicional, los modelos a escala ofrecen la posibilidad de simular fenómenos que no se pueden lograr "a voluntad" en un prototipo a escala real.

En este documento se presentan los resultados de pruebas de carga a compresión y extracción a pilotes individuales y a grupos de pilotes mediante de modelos a escala en el laboratorio, en suelos blandos de la CDMX. Se fabricaron tres tipos de pilotes de acero IR o H a escala y se desarrollaron pruebas en pilotes individuales y en grupos de 4 pilotes. Con base en los ensayos se presentan las curvas carga-desplazamiento tanto a compresión como tensión, indicando el comportamiento de estos pilotes bajo carga axial. Se compara el comportamiento de los pilotes de grupo y los pilotes individuales evaluando el efecto de grupo ante carga axial. Además, durante las pruebas de tensión, los pilotes se extrajeron en su totalidad con la finalidad de mostrar el material que queda adherido al pilote y cuantificar la sección del pilote equivalente.



1. INTRODUCCIÓN

En México se han realizado modelos a escala de pilas coladas in situ (e.g. Ibarra E. 2013), y pilotes de acero tubulares (e.g. Luna O., 2002; Cruz E. 2003), y en otras partes del mundo se han utilizado modelos a escala de pilotes para evaluar la eficiencia de grupo (Bilal et al., 2019). La investigación 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 en suelos blandos. 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.

Los objetivos de este trabajo incluyen la ejecución de pruebas de carga en el laboratorio de modelos a escala de pilotes de acero tipo IR para medir su capacidad de carga axial a compresión y tensión, en pilotes individuales y grupos de 4 pilotes con arreglos de 2X2. Dentro de los alcances, se incluye construir y ensayar modelos a escala de pilotes de acero tipo IR; medir la capacidad de carga de pilotes individuales con diferentes relaciones de aspecto longitud y ancho de perfil, L/B; y simular el proceso de hincado de los pilotes IR.

1.1 Modelos a escala

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.

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 homólogas del modelo y del prototipo. La similitud cinemática se refiere al movimiento de partículas homólogas ente 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 puede ser 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^{-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.

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.

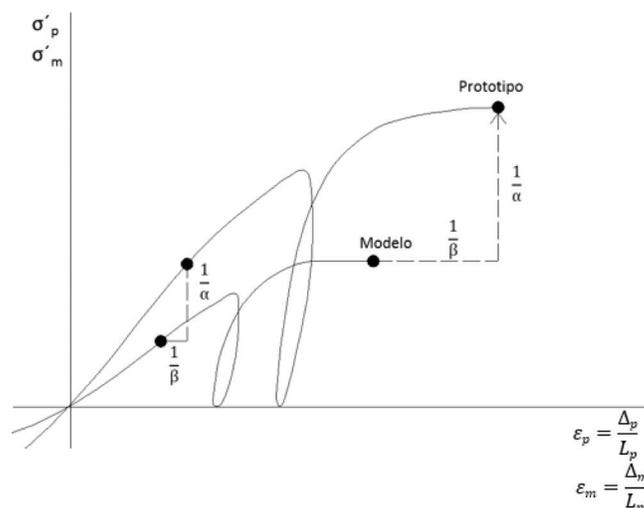


Figura 1. Similitud de las curvas esfuerzo-deformación para el prototipo y el modelo. Ciclos de carga y descarga (Rocha, 1957).

Roscoe (1968) 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 geoméricamente 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.

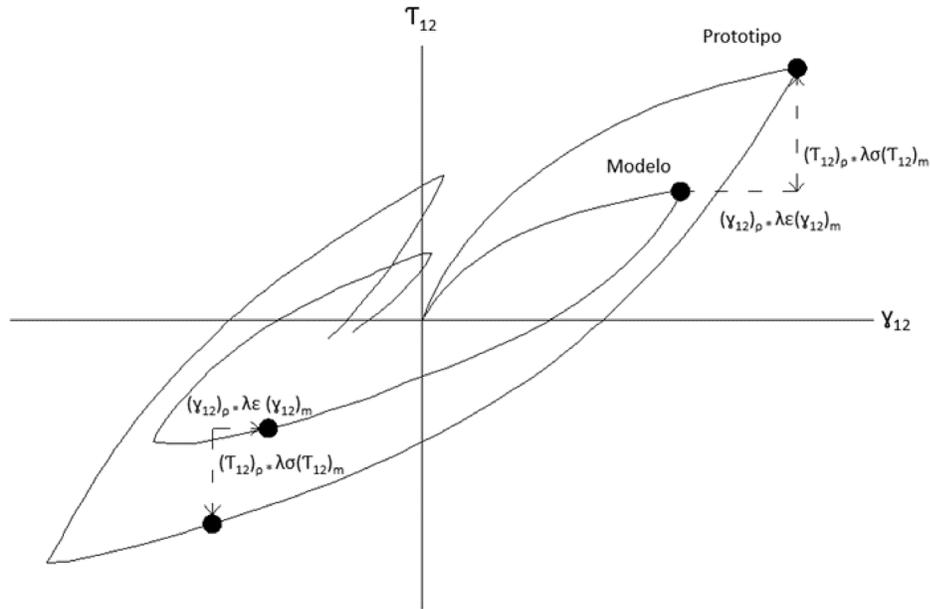


Figura 2. Concepto del estado crítico de mecánica de suelos de rutas de esfuerzos geoméricamente similares para el prototipo A1Z1 y el modelo A2Z2 (Modificado de Roscoe, 1968).

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:

$$\frac{x}{D} = \left(\frac{y}{D}, \frac{M_c}{DM}, \frac{J_c}{D^3M}, \frac{M}{\rho D^2}, \frac{EI}{E_r D^4}, \frac{EI}{E_f D^4}, \frac{FD^2}{EI}, \frac{MD^4 \omega^2}{EI}, \omega T_o, \frac{\omega^2 D}{g} \right) \quad \text{Ec.1}$$

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_f 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, lai 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.

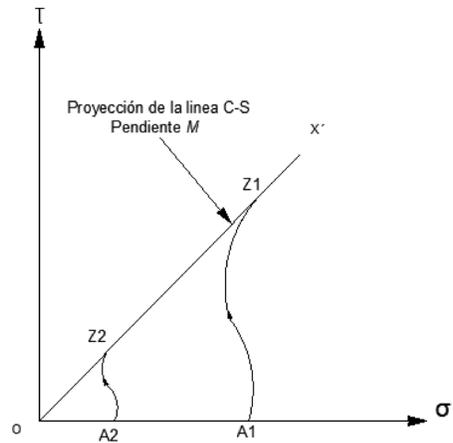


Figura 3. Formulación de módulos tangentes en modelos a escala para revisar el comportamiento constitutivo de suelos del prototipo A1Z1 y el modelo A2Z2 (Después de Iai, 1989).

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 suprimen los efectos secundarios obteniendo así un modelo a escala “adecuado”. Este enfoque es el que se emplea en esta investigación.

2. ELEMENTOS EMPLEADOS PARA LAS PRUEBAS DE CARGA AXIAL

2.1 Pilotes de acero

Los pilotes que se emplean en esta investigación corresponden a tres perfiles de acero tipo IR. En la Tabla 1 se muestran las dimensiones de los 3 pilotes prototipos (W10x17, W18x35 y W24x55) empleados en los análisis. En todos los casos para los pilotes se consideró un peso volumétrico γ_m de 78.5 kN/m^3 (7850 kg/m^3), un módulo de elasticidad de 205940 MPa ($2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$) y un esfuerzo de fluencia f_y de 345 MPa (3515 kg/cm^2).

Tabla Dimensiones de los perfiles de acero empleados como prototipo

Simbología	ID	M [kg/m]	d [mm]	tw [mm]	bf [mm]	tf [mm]	Pp [M]	Ap [cm ²]	Ix [cm ⁴]	Iy [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 de pilote

Ap: área transversal del pilote
Ix: momento de inercia con respecto al eje X
Iy: momento de inercia con respecto al eje Y

Tabla 1. Dimensiones de los perfiles de acero empleados como prototipo.

El uso de los factores de escala para cumplir las leyes de similitud que permiten hacer modelos a escala en el laboratorio ayuda a poder extrapolar resultados de los modelos a escala sobre pilotes a escala real. Sin embargo, es difícil de cumplir estas leyes en los modelos 1-G. A sabiendas de las limitaciones de una prueba de carga en el laboratorio, 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 1 de acuerdo con las ecuaciones de similitud indicadas en Flores y Ramos (2021) mediante el teorema de Buckingham.

La Tabla 2 muestra las dimensiones de los pilotes y los factores de escala empleados para los pilotes identificados como W24x55. 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 demás factores para los perfiles W10x17, W18x35 se pueden consultar en Flores y Torres (2021).

ID del pilote		W10x17			W18x35			W24x55		
Variable	Unidades	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
E_p	[kg/cm ²]	2.10E+06	2.10E+06	1	2.10E+06	2.10E+06	1	2.10E+06	2.10E+06	1
E_s	[kg/cm ²]									
I_x	[cm ⁴]	3,409	2.822	1208.0	21,228	17.133	1239.0	56,191	62.901	893.3
I_y	[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 2. Factores de escala y características de los pilotes empleados en los modelos a escala.

Se fabricaron 6 piezas de cada pilote a escala con las dimensiones de la Tabla 2, teniendo longitudes de los pilotes a escala de 0.714 m para los perfiles W24x55 y de 0.625 m para los pilotes W10x17 y W18x35. A las longitudes indicadas, 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 4) 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. La Figura 4 presenta los esquemas con las dimensiones de los perfiles prototipo (color azul) y los modelos a escala (color rojo) que se fabricaron para este ensayo.

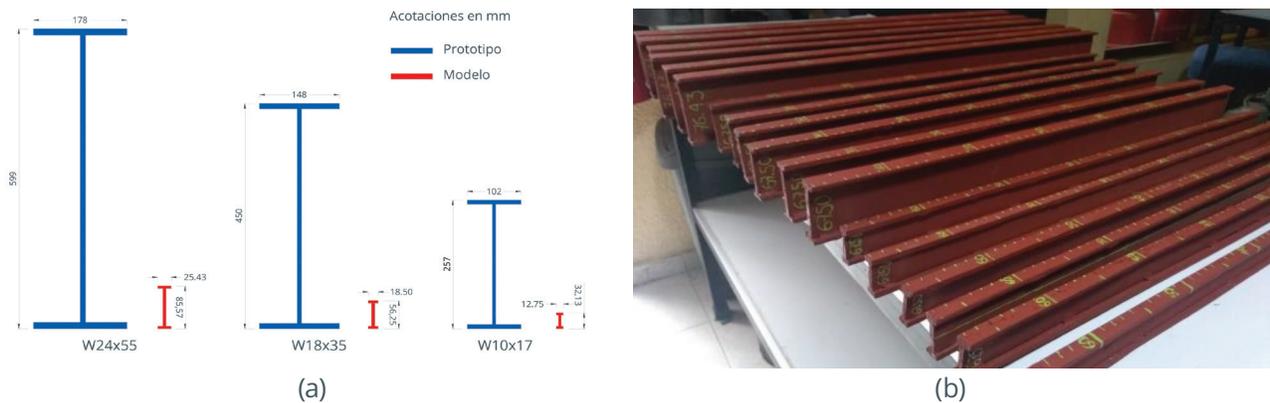


Figura 4. (a) Perfiles de acero prototipo y a escala considerados en los análisis a partir del uso de las relaciones de Similitud y (b) Fotografías de los 18 pilotes a escala tipo IR.

2.2 Contenedores de suelo

Las dimensiones de los contenedores 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 5, siendo el contenedor para los pilotes W24x55 de mayores dimensiones, 0.77 m x 0.77 m en planta y una altura de 100 cm. Los contenedores se fabricaron con lamina 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 enrazar el material conforme se coloque en el recipiente.

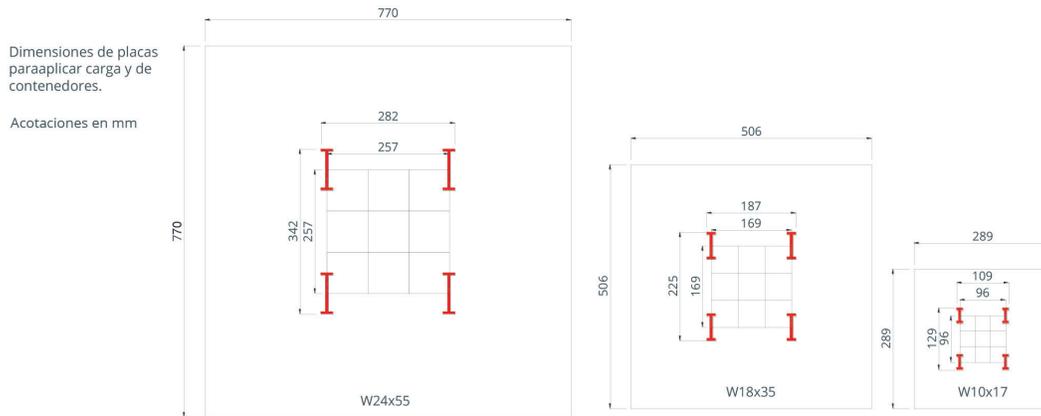


Figura 5. Distribución de grupos de pilotes en los modelos a escala con separaciones de 3 veces el ancho d. Las medidas de los recuadros aplicar corresponden a las dimensiones mínimas de los contenedores.

2.3 Descripción del suelo

El sitio donde se recolectó el material se encuentra ubicado en las coordenadas geográficas Latitud: 19.291° Longitud: -99.050°, en la alcaldía Tláhuac de la Ciudad de México. El sitio se encuentra en la Zona III, comúnmente denominada zona lacustre, de acuerdo con el mapa de zonificación geotécnica propuesto en las Normas Técnicas Complementarias (NTC, 2017), esta zona es conocida por encontrarse constituida por suelos de alta compresibilidad y baja resistencia al esfuerzo cortante. Se realizó un pozo a cielo abierto, del cual se extrajeron muestras de tipo alteradas para ejecución de pruebas índice y pruebas mecánicas, además de recolectar suelo para llenar los contenedores.

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

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.

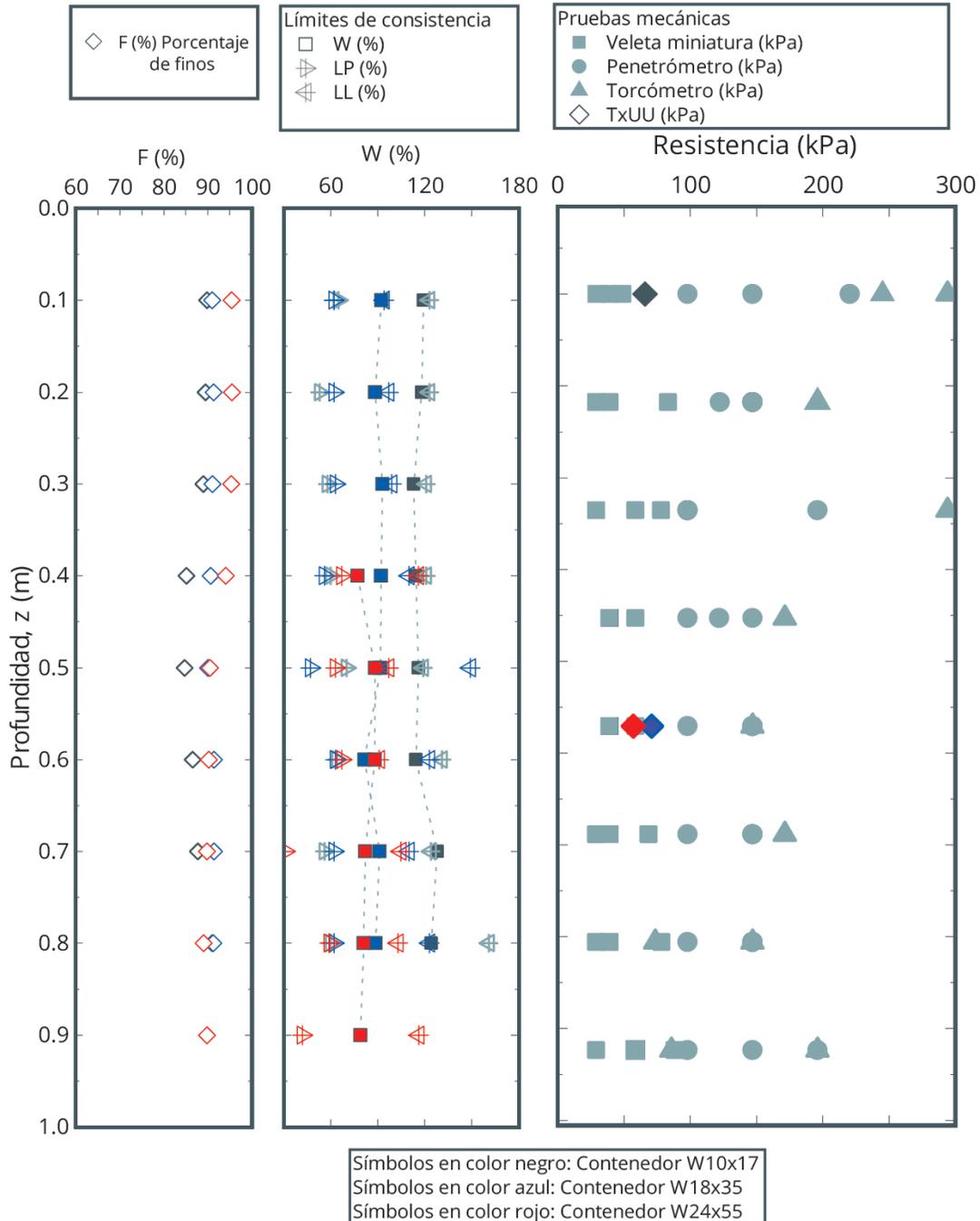


Figura 6. Perfiles estratigráficos de los tres contenedores.

Una vez que se obtuvieron los resultados de laboratorio se realizó un perfil estratigráfico a cada contenedor, ver Figura 6. Se realizaron pruebas de tipo mecánicas orientadas a determinar los parámetros de resistencia. Para el material de cada contenedor, se incluyeron pruebas de penetrómetro, pruebas de veleta miniatura y torcómetro a cada capa de los contenedores y una prueba Triaxial no-consolidada no-drenada (TxUU). Los resultados de resistencia al esfuerzo cortante variaron entre 57 kPa y 71 kPa. Los resultados de las pruebas mecánicas TxUU se muestran en la Tabla 3 y la Figura 7.

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

σ_c : esfuerzo de confinamiento
 σ_{df} : esfuerzo desviador a la falla

E_{50} : módulo de elasticidad
 S_u : esfuerzo al corte

Tabla 3. Resultados de las pruebas triaxiales TxUU.

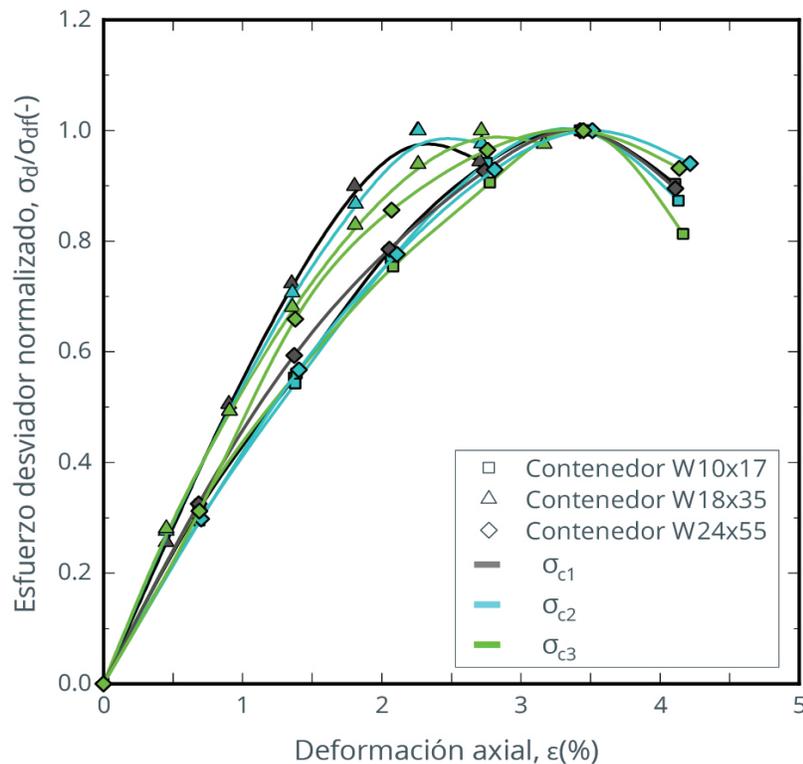


Figura 7. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas TxUU.

2.4 Marco de carga y sistema de medición de carga y lectura de desplazamientos

El marco de carga fue construido con perfiles de acero estructural de 4 pulgadas de peralte. Cuenta con dos columnas y una trabe donde se coloca el cilindro de embolo hueco, para aplicar la carga axial como se presenta en la Figura 8a. 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 8b. En la base se colocaron unas extensiones para que descansen los contenedores y sirvan de contrapeso durante las pruebas. La altura es de 1.8 m, y puede desmontarse y montar unas extensiones en las columnas para tener una altura suficiente para realizar el hincados de los pilotes. El sistema para aplicar las cargas a compresión y tensión consta de una bomba hidráulica, un cilindro de embolo hueco de 30 ton. Se empleó una celda de carga de 5 ton. La medición de los desplazamientos se realiza mediante dos micrómetros.

Para los perfiles W24X55 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 9a. Con relación a los perfiles W10X17 y W18X35 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 9b.

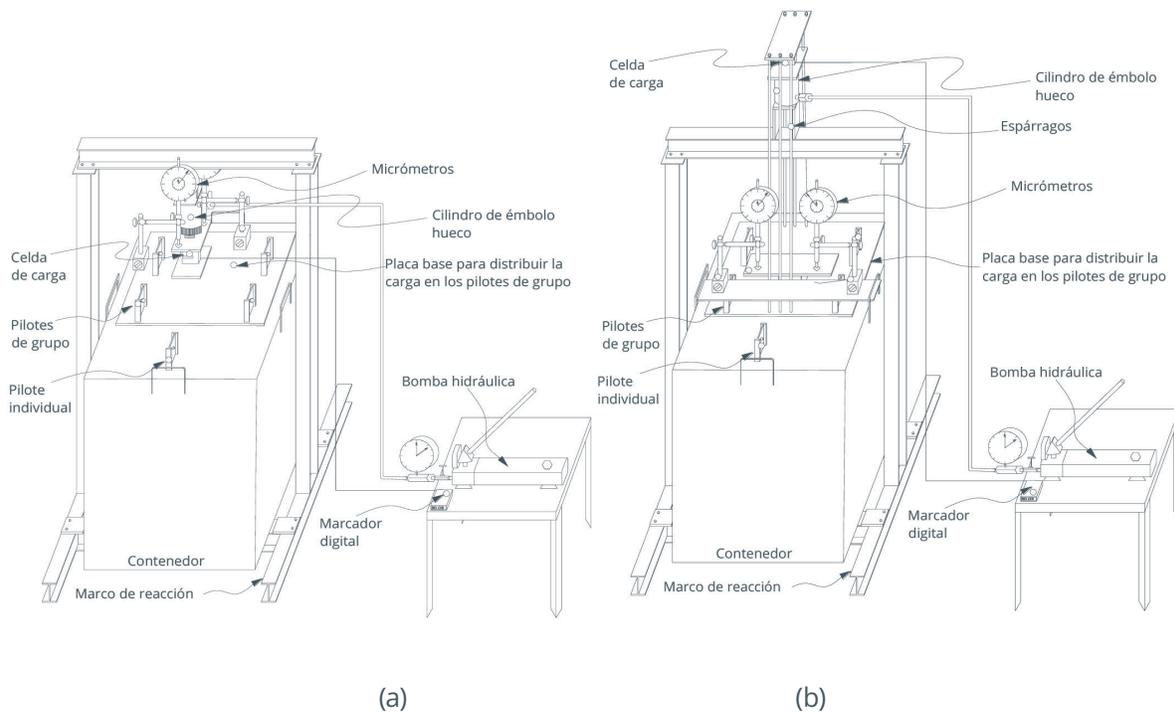
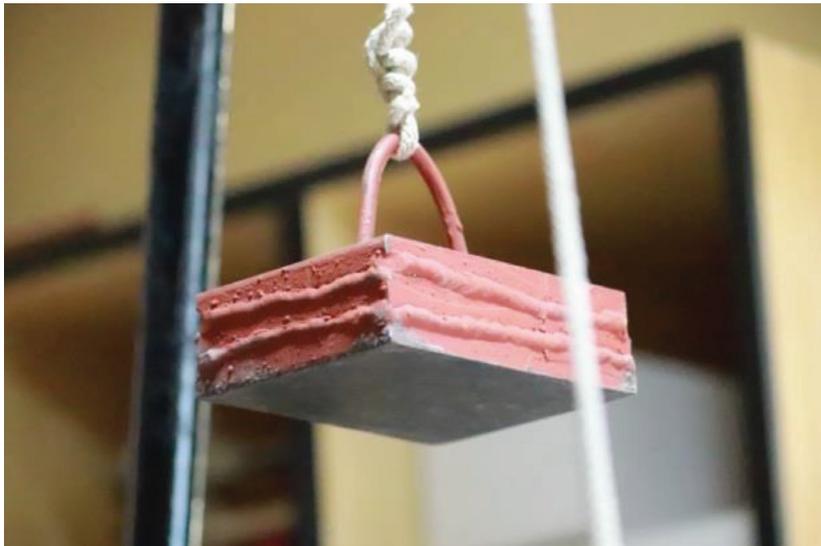


Figura 8. (a) Sistema para pruebas de carga axial a compresión y (b) extracción



(a)



(b)

Figura 9. (a) Sistema de hincado del contenedor 24X55
y (b) Sistema de hincado de los contenedores 10X17 y 18X35

3. PRUEBAS DE CARGA AXIAL

3.1 Hincado de pilotes

En suelo blando es común que la instalación se realice mediante martillos de impacto o vibromartillos. En este trabajo, se simuló el hincado de los pilotes mediante martillo de impacto, dejando caer una masa de acero de 3.82 kg y alturas de caída entre 0.15 y 0.45 m (Ver Figura 10). Se hincaron 15 pilotes, 5 en cada contenedor, uno corresponde al pilote individual y los cuatro restantes corresponden al grupo de cuatro pilotes (arreglo de 2X2). Durante el hincado de los pilotes se llevó un registro del número de golpes cada 0.05 m de penetración. Las gráficas de hincado pueden consultarse en Flores y Torres, 2021. Los pilotes de mayores dimensiones requirieron un número de golpes (20 a 80 golpes/0.05m) y altura de caída mayor (0.10 a 0.4 m), y en el hincado de los dos primeros pilotes se tuvo un número de golpes altos debido a que se tenía un desalineamiento del eje y la masa golpeadora, que fue corregido para los demás hincados. Con relación al hincado de los pilotes W18X35, se tuvo un comportamiento similar por cada contenedor, con número de golpes y altura de caída incrementales con la profundidad. Los pilotes W10X17 presentaron una disminución considerable del número de golpes requeridos para el hincado con valores medidos de 6 a 8 golpes por cada 0.05 m y alturas de caída de 0.3 m.

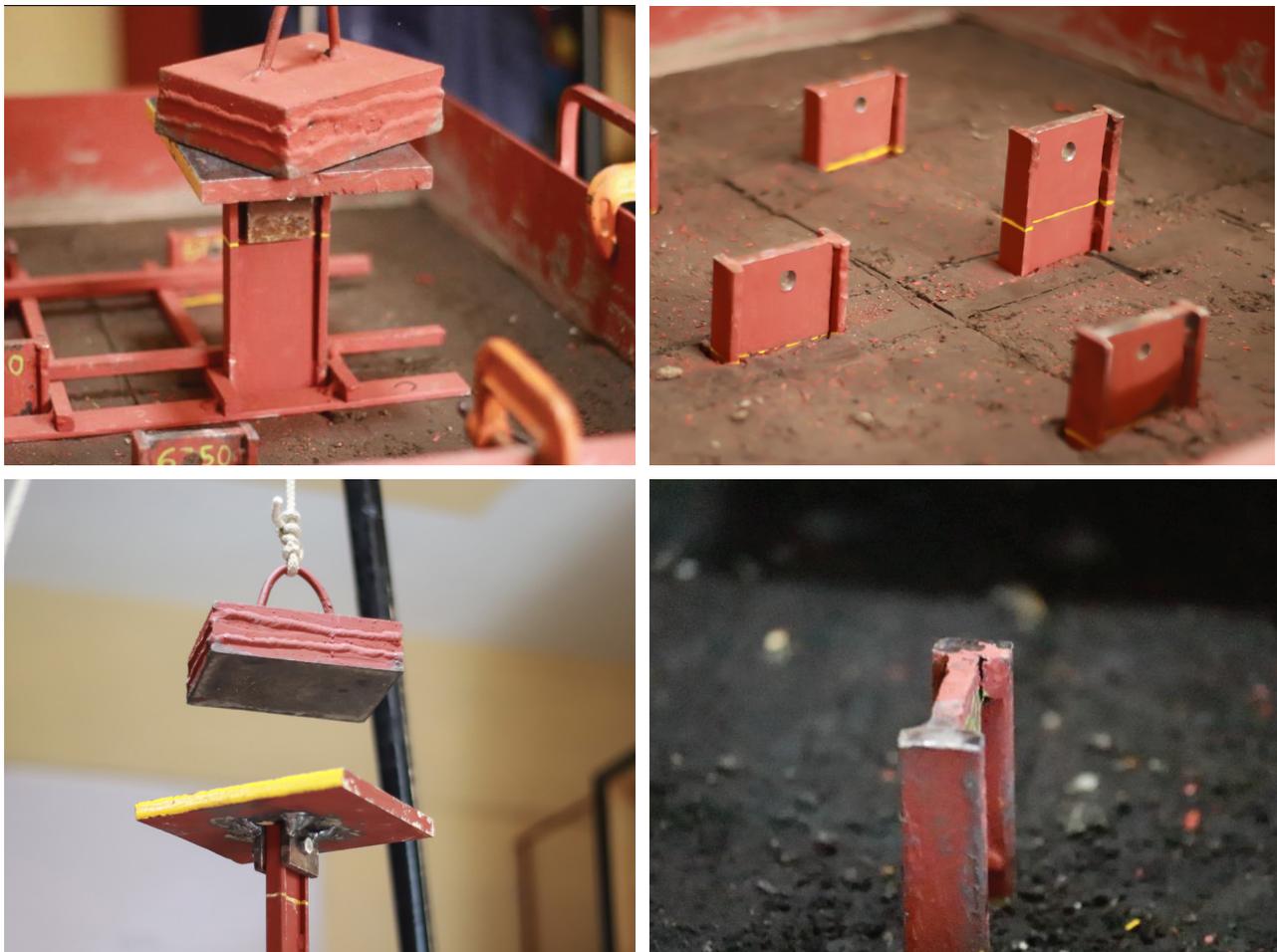


Figura 10. Hincado de los pilotes.

3.2 Ejecución de pruebas y resultados

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. Las pruebas de compresión axial se realizaron a los 14 y 30 días posteriores al hincados los pilotes. Una vez terminadas las pruebas de compresión se ejecutaron las pruebas de tensión axial estática con un tiempo de espera de 14 días adicionales. El programa de pruebas se presenta en la Tabla 4.

Con base en los criterios de aplicación de carga indicados en las normas ASTM D1143 y D3689 sobre pruebas de carga a compresión y tensión, respectivamente, se seleccionaron incrementos de carga y debido a que las pruebas se realizaron en pilotes a escala, los criterios de incrementos se ajustaron con pruebas de calibración previas ejecutadas para medir la sensibilidad de los equipos y el suelo a la aplicación de cargas.

Para la ejecución de las pruebas se inició con el arreglo del contenedor sobre el marco como se indica en la Figura 8a, una vez acomodado y centrado se colocaron dos micrómetros en cada prueba, y se comenzó la prueba como se muestra en la Figura 9a y 9b, 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 no fue capaz de tomar más carga se prosiguió a la descarga. Se tomaron lecturas al descargar los grupos de pilotes.

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

Tabla 4. Pruebas de carga ejecutadas.



Figura 11. Prueba de compresión axial al grupo de pilotes W24x55.

4. PRUEBAS DE COMPRESIÓN

4.1 Pilotes W24x55 a compresión

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 11. 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. 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 12. 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 ensaye después de 30 días de haberse instalado el pilote.

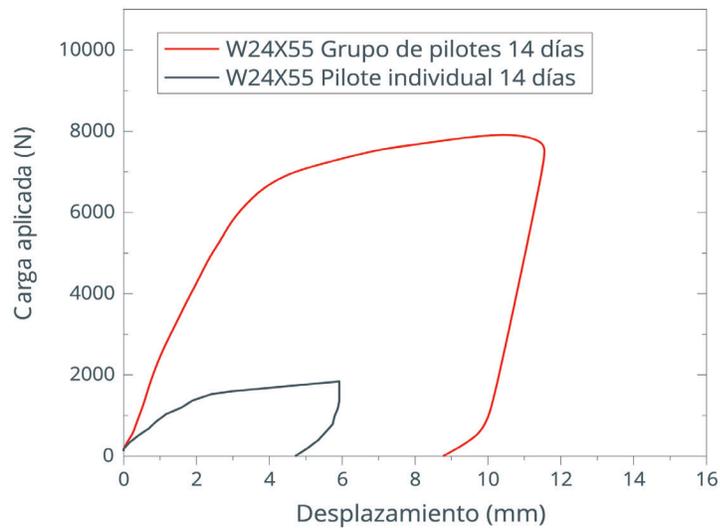


Figura 12. Curvas carga-desplazamiento de las pruebas de compresión para el grupo de cuatro pilotes y para el pilote individual, W24X55.

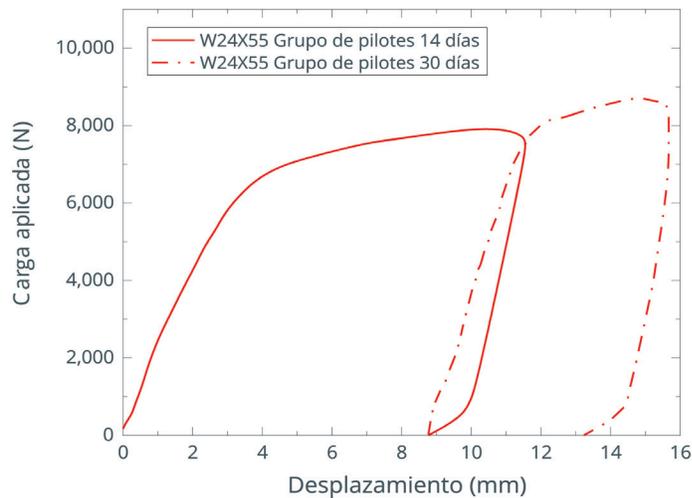


Figura 13. Comparación de curvas carga-desplazamiento de las pruebas de compresión al grupo de pilotes a diferentes tiempos, pilotes W24X55

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 14. 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.

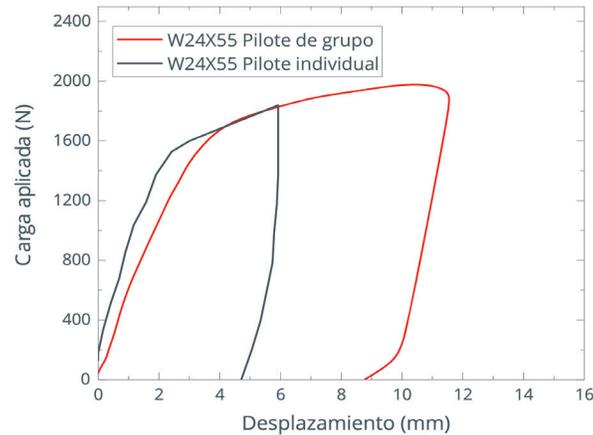


Figura 14. Comparación de las curvas de un pilote de grupo y el pilote individual, W24X55.

4.2 Pilotes W18x35 a compresión

Para los pilotes de W18X35 los resultados de compresión axial a 14 días fueron descartados, debido a que los incrementos planteados fueron muy grandes. 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 5.13 mm. En la prueba de grupo se tuvo una carga máxima de 5489 N con un desplazamiento de 7.51 mm, ver Figura 15.

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 16. 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.

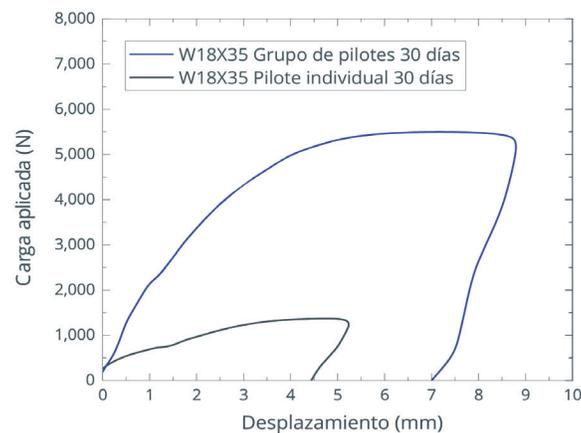


Figura 15. Curvas carga-desplazamiento de las pruebas de compresión para el grupo de cuatro pilotes y para el pilote individual, W18X35.

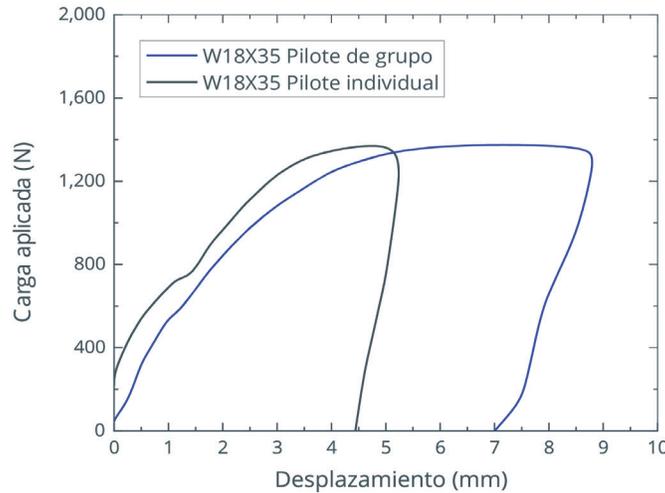


Figura 16. Comparación de las curvas de un pilote de grupo y el pilote individual, W18X35.

4.3 Pilotes W10x17 a compresión

En la prueba de grupo de pilotes se ejecutaron con incrementos de 98 N una carga máxima de 667 N con un desplazamiento de 1.42 mm, ver figura 17. Para las pruebas a los 30 días de carga axial a compresión se tuvo una carga máxima de 978 N con un desplazamiento acumulado de 4.43 mm, ver Figura 17.

Se tuvieron dificultades para aplicar la carga al pilote individual por lo que no se presentan los resultados. Esta dificultad se asocia a la baja capacidad de carga del pilote individual W10x17 y a que el sistema de carga no permitió aplicar incrementos pequeños menores a los 50 N.

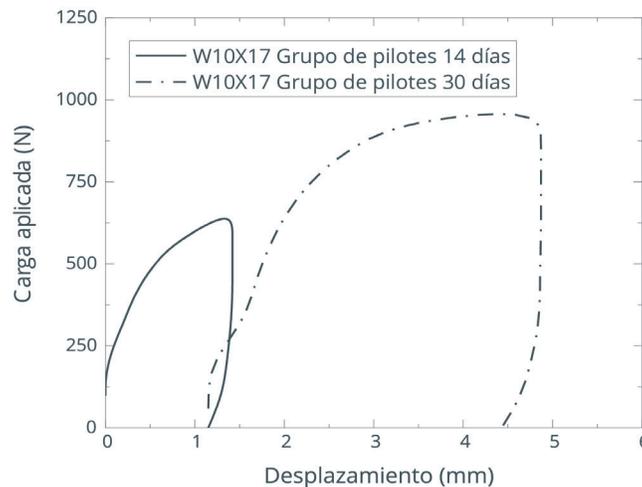


Figura 17. Comparación de curvas carga-desplazamiento de las pruebas compresión al grupo de pilotes a diferentes tiempos, pilotes W10X17.

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 transversales de los pilotes prototipos proyectadas como un rectángulo $d \cdot b \cdot f$. 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 18.

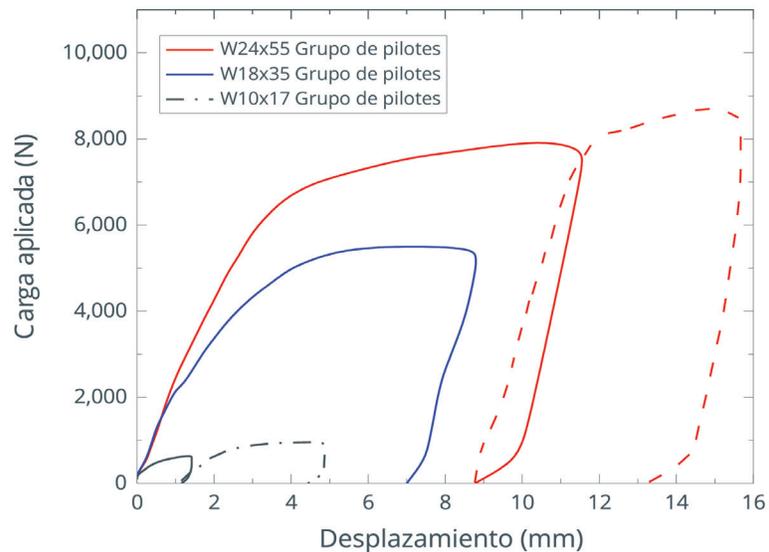


Figura 18. Comparación de las curvas carga-desplazamiento de las pruebas de compresión a los distintos grupos de pilotes.

4.4 Pilotes a tensión

Las pruebas de carga a tensión axial se realizaron con base en la norma ASTM D3689. Para la ejecución de las pruebas a extracción, se cambió el arreglo de la celda de carga y el cilindro de émbolo hueco sobre el marco como se indica en la Figura 9b, una vez acomodado y centrado se colocaron dos micrómetros en cada prueba, y se comenzó la prueba como se muestra en la Figura 19. Las pruebas a tensión fueron realizadas 14 días después de ejecutadas las pruebas a compresión. Al igual que las pruebas de compresión, 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 de extracción; una vez que se presentaron deformaciones grandes, se dejó de aplicar carga.

La Figura 20 presenta los resultados de las pruebas de tensión a los pilotes W24x55 tanto de grupo como individual. 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. Para el pilote individual se obtuvo una carga máxima de tensión de 843 N con un desplazamiento de 14.54 mm.

Con relación a los pilotes W18x35, para pilote individual se realizaron incrementos de 50 N con una carga máxima de tensión de 706 N y un desplazamiento de 14.14 mm. En la prueba de 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 21.

Debido nuevamente a dificultades en la aplicación de pequeños incrementos de carga no se presentan los resultados pruebas de extracción axial para los pilotes W10x17.

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 22 y la Figura 23, 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 24). Los pilotes individuales tienen el mismo comportamiento, la diferencia radica en que ambos pilotes W24X55 y W18X35 mostraron desplazamientos máximos similares (Figura 25).



Figura 19. Prueba de tensión axial al grupo de pilotes W24x55

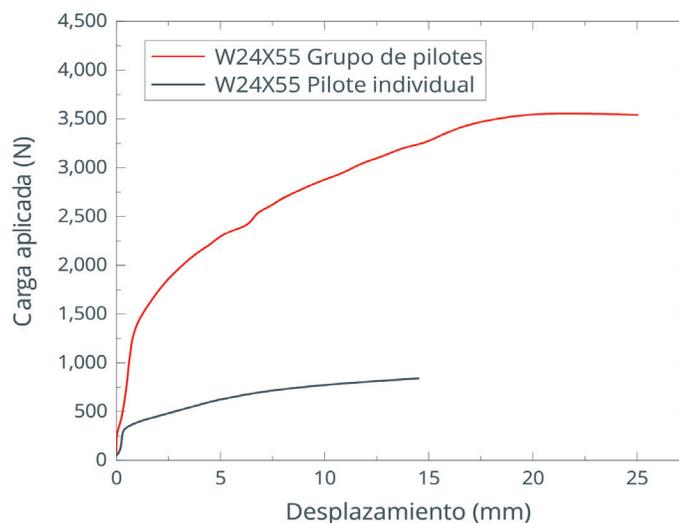


Figura 20. Curvas de carga y desplazamiento de las pruebas de carga a tensión axial, W24X55.

Una vez terminadas las pruebas de tensión se extrajeron 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 26). 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 27 muestra imágenes obtenidas 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 26.

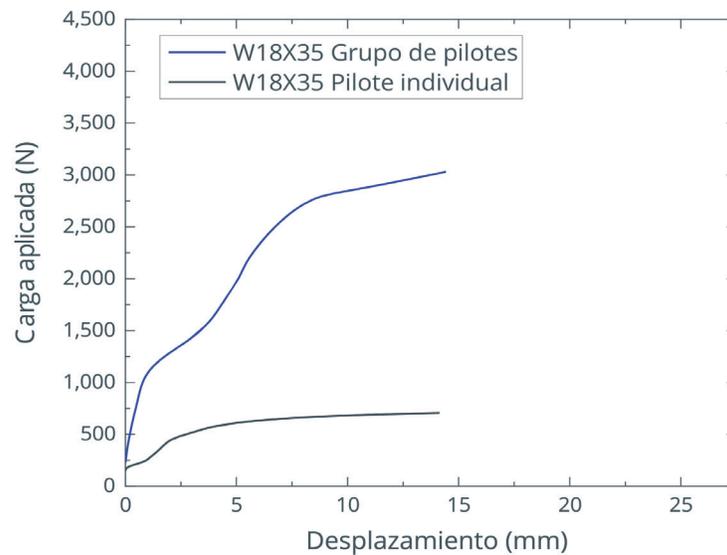


Figura 21. Curvas de carga y desplazamiento de las pruebas de carga extracción axial, W18X35.

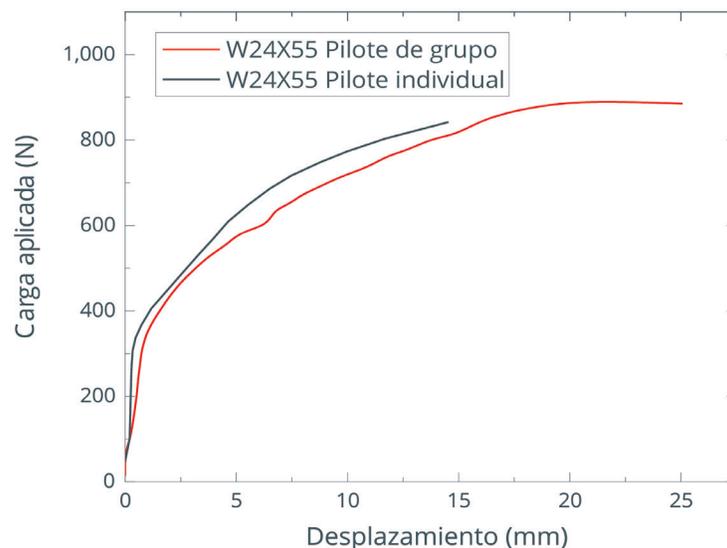


Figura 22. Comparación de las curvas a tensión de un pilote de grupo y el pilote individual, W24X55.

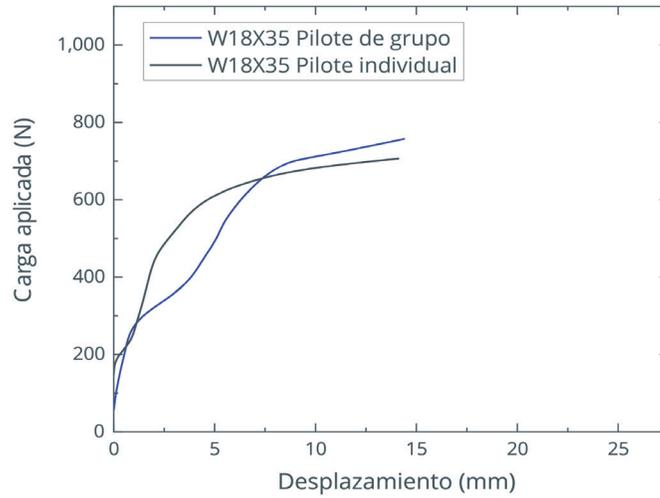


Figura 23. Comparación de las curvas a tensión de un pilote de grupo y el pilote individual, W18X35.

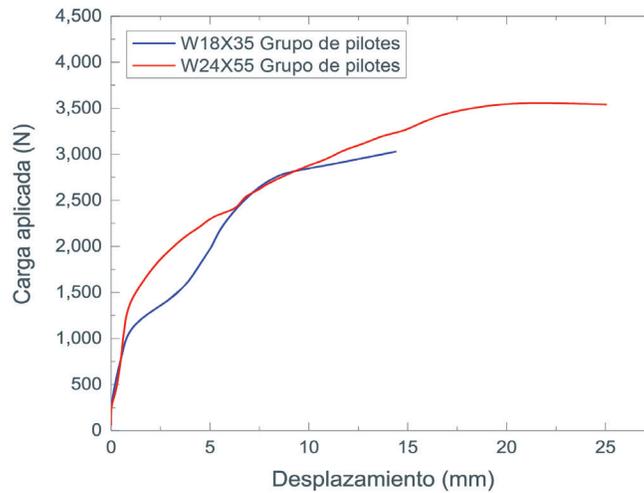


Figura 24. Comparación de curvas carga y desplazamiento de las pruebas de carga extracción axial para los grupos de pilotes W24X55 y W18X35.

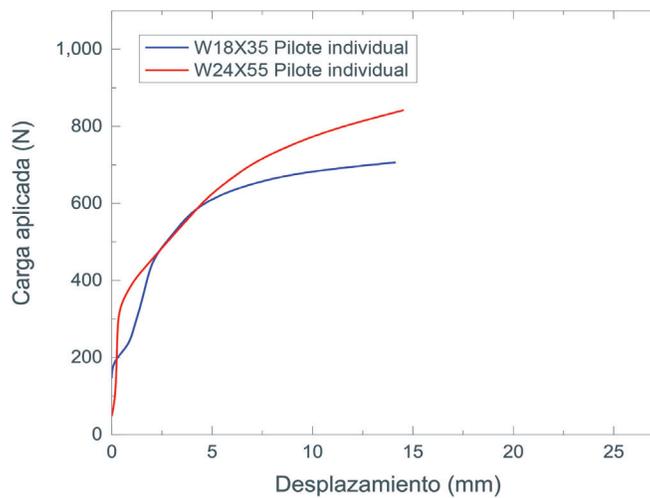


Figura 25. Comparación de curvas carga y desplazamiento de las pruebas de carga extracción axial para pilotes individuales W24X55 y W18X35.



Figura 26. Fotografías de suelo adherido al pilote al extraerlo después de la prueba de carga a tensión.

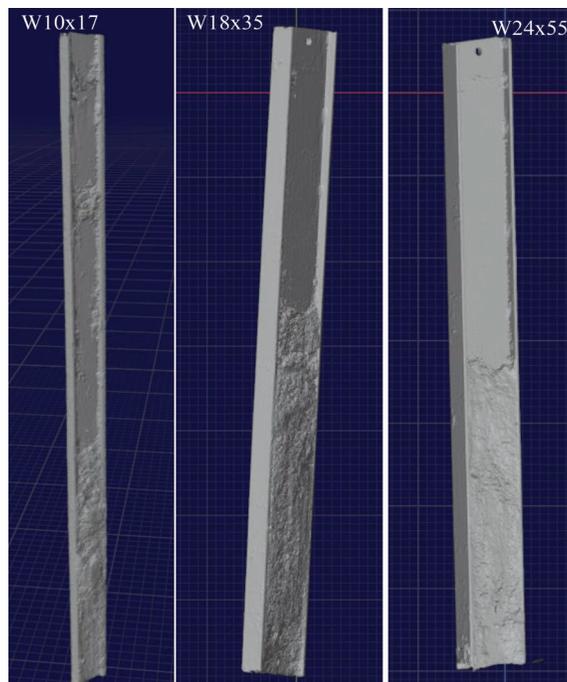


Figura 27. Imágenes obtenidas con el escáner 3D de los pilotes extraídos.

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

$$\eta = Q_g / nQ_s \quad \text{Ec.2}$$

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.

5. 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 evaluará el efecto de grupo en distancias menores de 3 veces el ancho, d . También se realizarán 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 pretende evaluar tiempo de hasta 6 meses o mayor.

6. REFERENCIAS

ASTM D1143-Standard Test Methods for Deep Foundation Elements Under Static Axial Compressive Load

ASTM D3689-Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Tensile Load

Bilal J. Noman, Safaa H. Abd-Awn, and Hassan O. Abbas (2019). "Effect of Pile Spacing on Group Efficiency in Gypseous Soil". Civil Engineering Journal Vol. 5, No. 2, February 2019.

Cruz E. (2003). 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.

Flores F.A y Ramos J.B. (2021). "Modelos a escala de pilotes de acero tipo IR bajo carga axial". Proyecto de Investigación Aplicada, IGM Ingenieros Geotecnistas Mexicanos. Reporte N°2020.IGM.INV.002.001

Flores F.A. y Torres R. (2021). "Static Behavior of Steel H-Piles under axial load using scale models in Very Soft Soil Clays", Proceedings of the 46th Annual Conference on Deep Foundations, DFI MGM Grand, Las Vegas, October 12-15.

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.

Ibarra E. (2013). "Transferencia de carga axial por fricción de pilas coladas In Situ al subsuelo granular". Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería, UNAM, octubre

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.

Kline, S. (1965). "Similitude and Approximation Theory", McGraw-Hill, New York.

Langhaar, H. (1951). Dimensional Analysis and Theory of Models, John Wiley and Sons, New York.

Luna O.J. (2002). "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.

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.

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.

Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTCDCC) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal publicado en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México el 15 de diciembre de 2017.

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.

Roscoe, K. (1968). "Soils and Model Tests," J. of Strain Analysis, 3(1), 57-64.



DIRECTORIO

OFICINAS COMERCIALES

T. +52 55 5262 7300 / Av. Ejército Nacional 216 P.2, Anzures, Miguel Hidalgo, CDMX, 11590.

ÁREA DE DESARROLLO DE MERCADO

desarrollodemercado@gerdau.com

PLANTAS

CD. SAHAGÚN

T. +52 791 913 8105 / Km. 3 Ctra. Mex - Cd. Sahagún, Zona Ind. Tepeapulco, Cd. Sahagún, Hidalgo, 43990

TULTITLÁN

T. +52 55 5894 0044 / 2487 2065 / Primera Sur S/N, Independencia, Tultitlán, Edo. de México, 54915

LA PRESA

T. +52 55 5003 4030 / 5062 1916 / Av. La Presa 2, Zona Industrial La Presa, Tlalnepantla, Edo. De México, 54187

DISTRIBUCIÓN

CDMX

T. +52 55 5089 8930 / Año 1857 8, Ticomán, Gustavo A. Madero, CDMX, 07330

MONTERREY

T. +52 81 8748 7610 / Blvd. Carlos Salinas de Gortari 404, Centro Apodaca, Nuevo León, 66600

PATIOS DE CHATARRA Y CENTROS DE RECOLECCIÓN

CD. SAHAGÚN

T. +52 791 9138 105 / Km. 3 Ctra. Mex - Cd. Sahagún, Zona Ind. Tepeapulco, Cd. Sahagún, Hidalgo, 43990

LA PRESA

T. +52 55 5003 4030 / 5062 1916 / Av. La Presa 2, Zona Industrial La Presa, Tlalnepantla, Edo. de México, 54187

LOS REYES

T. +52 55 5856 1651 / Tepozanes Los Reyes, Acaquilpan, México, 56428

GUADALAJARA

T. +52 33 3668 0285 / 36702769 / Av. 18 de Marzo 531, La Nogalera, Guadalajara, Jalisco, 44470

SAN JUAN

T. +52 55 2603 3275 / 5262 7359 / San Juan 669, Granjas Modernas, CDMX, 07460

TULTITLÁN

T. +52 55 5894 0044 / 2487 2065 / Primera Sur S/N, Independencia, Tultitlán, Edo. de México, 54915

VERACRUZ

T. +52 229 923 1359 / Ctra. Fed. Aluminio L. 7 o Camino Puente Roto Km. 1.5, Nuevo Veracruz, Veracruz, 91726



GERDAU CORSA

El futuro se moldea

gerdaucorsa.com.mx



Gerdau Corsa. El futuro se moldea.