

Evaluación de la capacidad de carga axial de grupo de pilotes de acero tipo IR mediante modelos a escala en suelos blandos de la Ciudad de México

Evaluation of the axial load capacity of a group of steel H-piles through scale models in soft soils of Mexico City

Francisco FLORES¹, Janeth RAMOS¹ y Rigoberto TORRES²

¹ IGM Ingenieros Geotecnistas Mexicanos, Ciudad de México, México

² Gerdau Corsa, Ciudad de México, México

RESUMEN: 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 trabajo se presentan los resultados de pruebas de carga a compresión y extracción de 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 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.

ABSTRACT: The use of scale models in geotechnics offers the advantage of simulating complex systems under controlled conditions and gives the opportunity to expand the knowledge of the fundamental mechanisms that operate in these systems. In many circumstances, scale models can offer cheaper alternatives than corresponding real scale models. Additionally, scale models offer the possibility of simulating phenomena that cannot be achieved "at will" in a real scale model. In this work, the results of compression load tests and extraction of pile groups are presented using scale models in the laboratory, in soft soils of the CDMX. Three types of steel H piles were fabricated to scale, and tests were carried out on individual piles and in groups of 4 piles. Based on the tests, the load-displacement curves both in compression and tension are presented, indicating the behavior of these piles under axial load. The behavior of the group piles and the individual piles is compared by evaluating the group effect under axial load. In addition, during the tension tests, the piles were completely extracted in order to show the material that remains adhered to the pile and to quantify the equivalent pile section.

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 grupos de 4 pilotes con arreglos de 2X2.

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 prototípicos (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/m³ (7850 kg/m³), un módulo de elasticidad de 205940 MPa (2.1×10^6 kg/cm²) y un esfuerzo de fluencia f_y de 345 MPa (3515 kg/cm²).

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

Simbología	ID	M [kg/m]	d [mm]	tw [mm]	b _f [mm]	t _f [mm]
	W10x17	25.30	257	6.1	102	8.4
	W18x35	52.20	450	7.6	152	10.8
	W24x55	82.00	599	10	178	12.8

M: Masa por unidad de longitud, d: peralte, tw: espesor del alma, b_f: ancho el patín, t_f: espesor del patín

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 prototípicos 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 b_f 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).

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 1) 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.

Tabla 2. Factores de escala y características de los pilotes empleados en los modelos a escala.

ID del pilote		W24x55		
Variable	Unidades	Prototipo	Modelo	Factor de escala
d	[mm]	599	85.57	7
b _f	[mm]	178	25.43	7
Mc	[kg]	181.36	2	90.68
M	[kg/m]	82	6.33	13.0
Ep	[kg/cm ²]		2.10E+06	1
I _x	[cm ⁴]	56,191	62.901	893.3
I _y	[cm ⁴]	1,211	1.506	804.1
L	[mm]	5000	714.3	7
d/L	-		8	1
ID del pilote		W18x35		
Variable	Unidades	Prototipo	Modelo	Factor de escala
d	[mm]	450	56.25	8
b _f	[mm]	148	18.50	8
Mc	[kg]	195.597	2	97.7985
M	[kg/m]	52.2	4.27	12.2
Ep	[kg/cm ²]		2.10E+06	1
I _x	[cm ⁴]	21,228	17.133	1239.0
I _y	[cm ⁴]	637	0.610	3250.0
L	[mm]	5000	625	8
d/L	-		11	1
ID del pilote		W10x7		
Variable	Variable	Prototipo	Modelo	Factor de escala
d	[mm]	257	32.13	8
b _f	[mm]	102	12.75	8
Mc	[kg]	232.648	2	116.324
M	[kg/m]	25.3	1.74	14.5
Ep	[kg/cm ²]		2.10E+06	1
I _x	[cm ⁴]	3,409	2.822	1208.0
I _y	[cm ⁴]	148	0.196	755.1
L	[mm]	5000	625	8
d/L	-		19	1

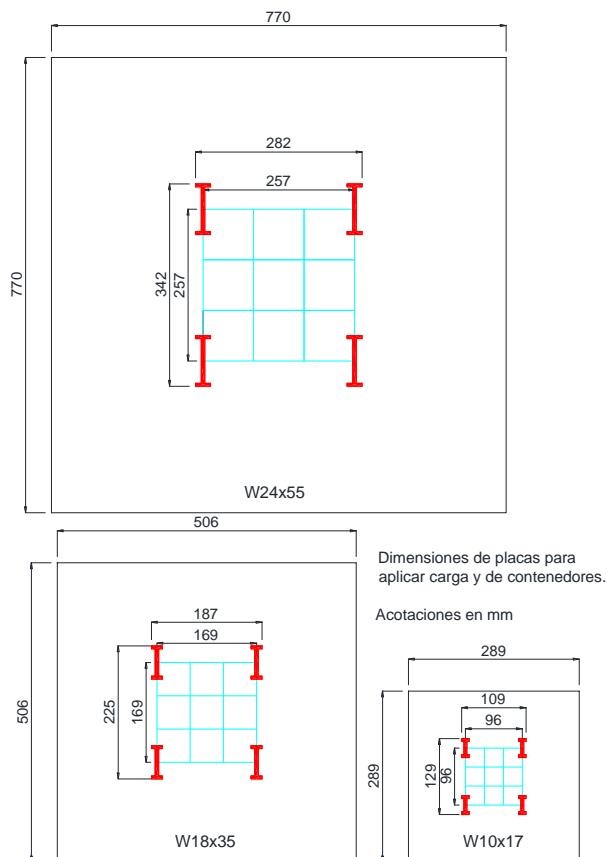
Mc: Masa sobre la cabeza del pilote, M: Masa por unidad de longitud, Ep: módulo de elasticidad del pilote, I_x: momento de inercia con respecto al eje X, I_y: momento de inercia con respecto al eje Y, L: longitud del pilote.



Figura 1. Fotografía de los 18 pilotes a escala tipo IR, marcados a cada 1 cm para llevar un registro de hincado.

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 2, 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 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 coloque en el recipiente.



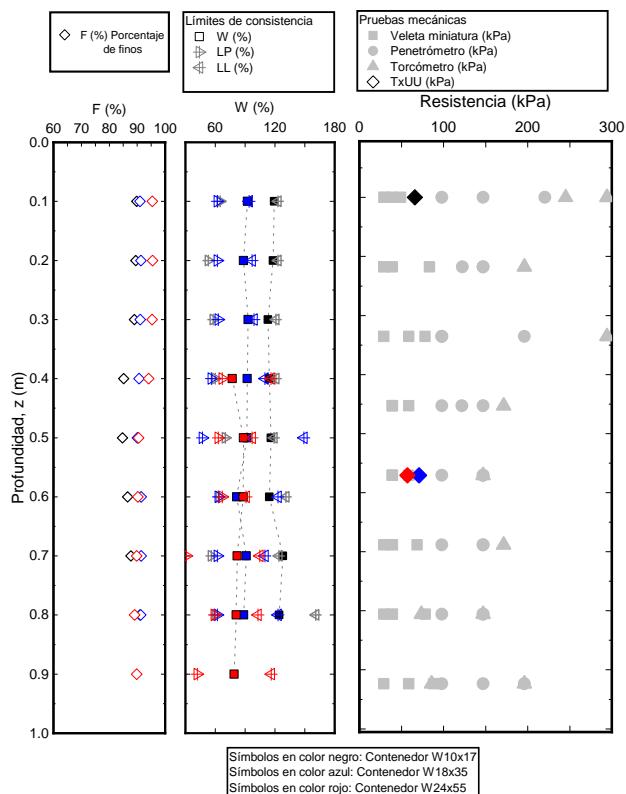
2.3 Descripción del suelo

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.



Una vez que se obtuvieron los resultados de laboratorio se realizó un perfil estratigráfico a cada contenedor, ver Figura 3. Se realizaron pruebas de

tipo mecánicas orientadas a determinar los parámetros de resistencia y de compresibilidad de los suelos. 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 de consolidación unidimensional (CU) 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.

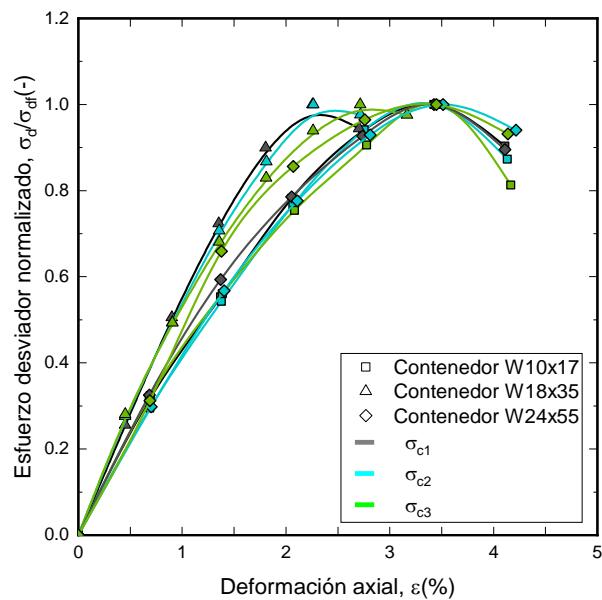


Figura 4. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas TxUU.

Tabla 3. Resultados de las pruebas triaxiales TxUU.

ID	σ_c	σ_{cf}	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_{cf} : esfuerzo desviador a la falla, E_{50} : módulo de elasticidad y S_u : esfuerzo al corte.

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 5a. 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 5b. 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.

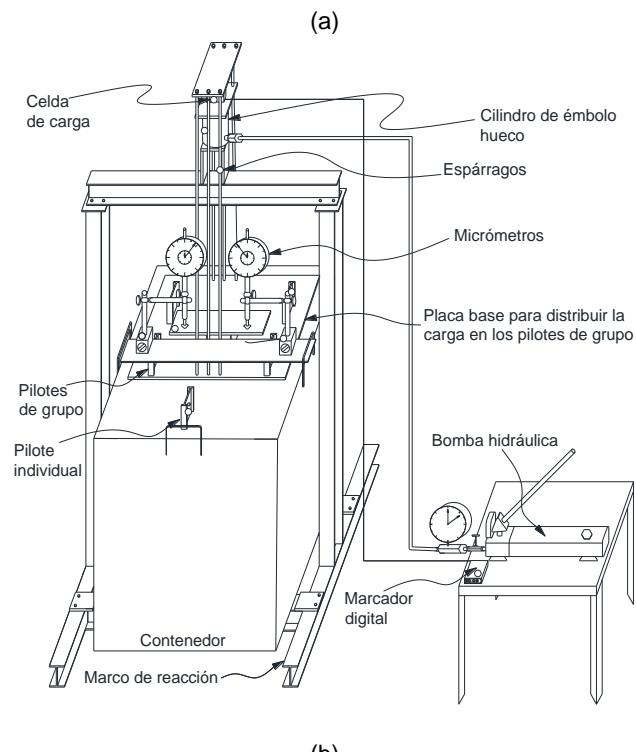
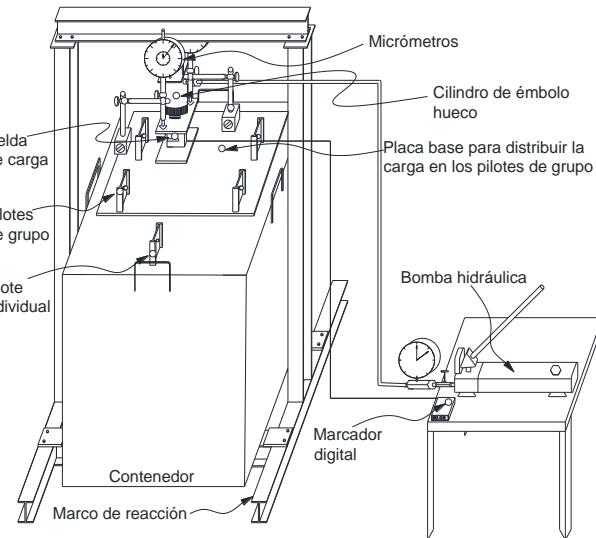


Figura 5. (a) Sistema para pruebas de carga axial a compresión y (b) extracción.

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 6). 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.

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 contenedor. 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 4.

Las pruebas de carga a compresión axial, se realizaron con base en la norma ASTM D1143. Para la ejecución de las pruebas se inició con el arreglo del contenedor sobre el marco como se indica en la Figura 5a, una vez acomodado y centrado se colocaron dos micrómetros en cada prueba, y se comenzó la prueba como se muestra en la Figura 7, 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.

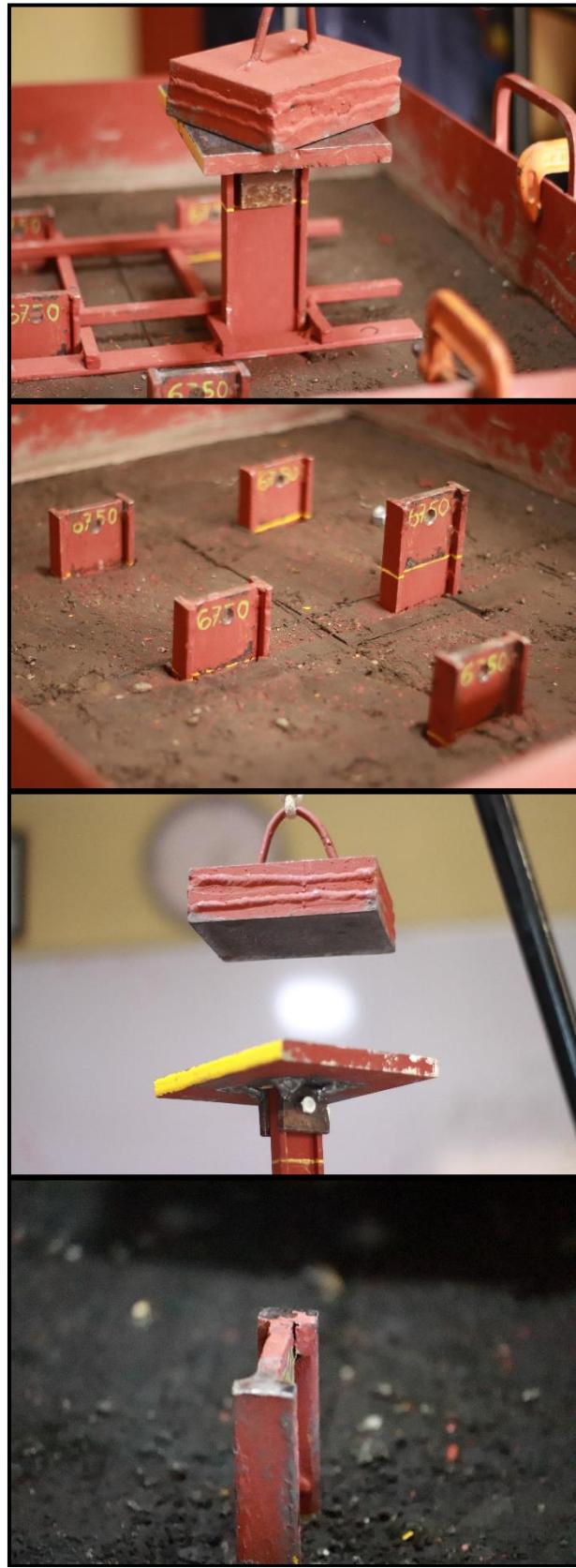


Figura 6. Hincado de los pilotes.

Tabla 4. 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



Figura 7. Prueba de compresión axial al grupo de pilotes W24x55.

3.2.1 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 8. 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 9. Si comparamos las dos etapas, se observa un comportamiento de endurecimiento del geomaterial 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.

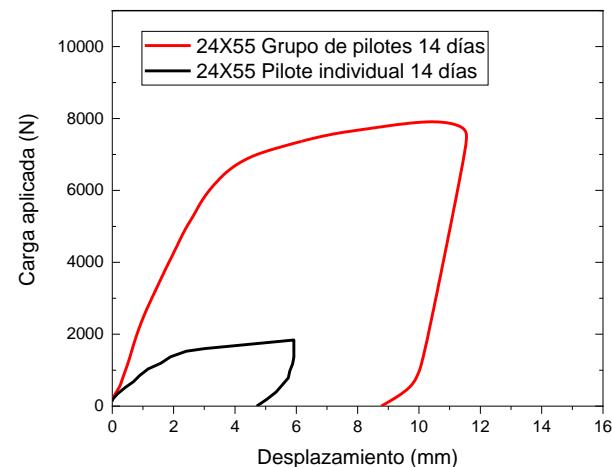


Figura 8. Curvas carga-desplazamiento de las pruebas de compresión para el grupo de cuatro pilotes y para el pilote individual, W24X55.

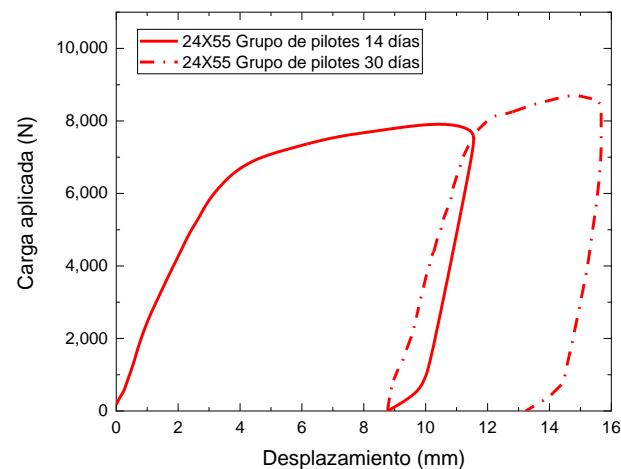


Figura 9. Comparación de curvas carga-desplazamiento de las pruebas de compresión al grupo de pilotes a diferentes tiempos, pilotes W24X55.

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 10. 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.

3.2.2 Pilotes W18x35 a compresión

Respecto al contenedor 18X35 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 11.

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 12. 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.

3.2.3 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 512. 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 13.

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.

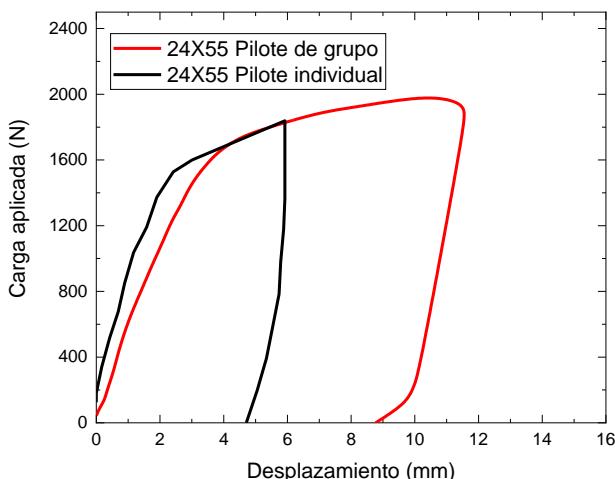


Figura 10. Comparación de las curvas de un pilote de grupo y el pilote individual, W24X55.

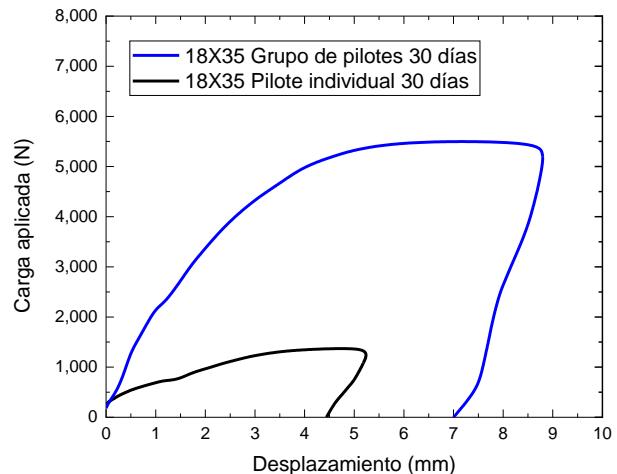


Figura 11. Curvas carga-desplazamiento de las pruebas de compresión para el grupo de cuatro pilotes y para el pilote individual, W18X35.

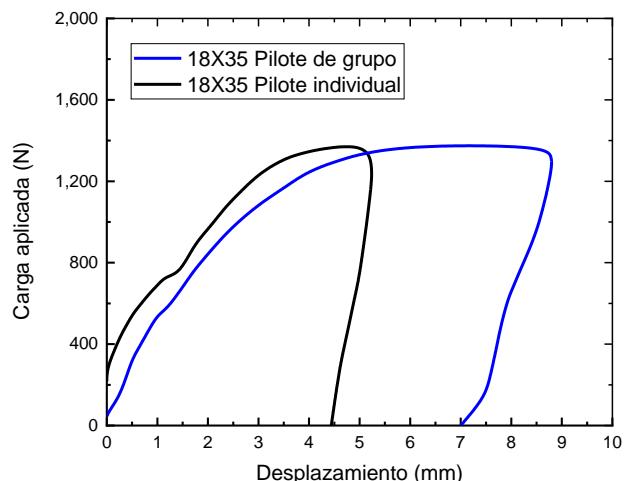


Figura 12. Comparación de las curvas de un pilote de grupo y el pilote individual, W18X35.

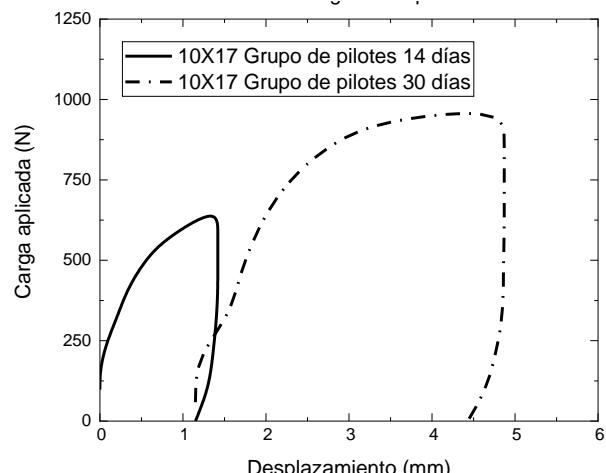


Figura 13. Comparación de curvas carga-desplazamiento de las pruebas compresión al grupo de pilotes a diferentes tiempos, pilotes W10X17.

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 prototípicos proyectadas como un rectángulo d^*b_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 14.

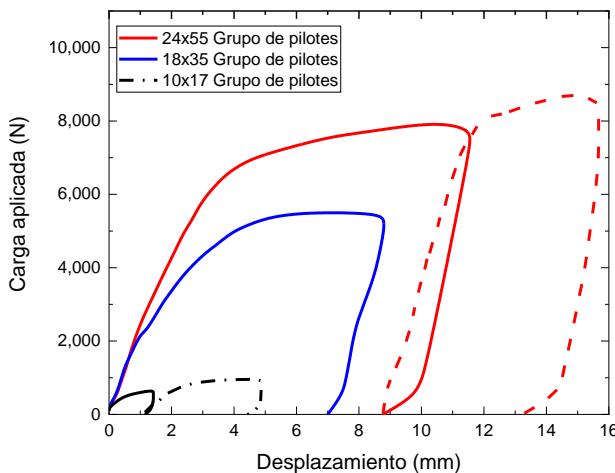


Figura 14. Comparación de las curvas carga-desplazamiento de las pruebas de compresión a los distintos grupos de pilotes.

3.2.4 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 5b, una vez acomodado y centrado se colocaron dos micrómetros en cada prueba, y se comenzó la prueba como se muestra en la Figura 15. 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 16 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.



Figura 15. Prueba de tensión axial al grupo de pilotes W24x55.

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 17.

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 las Figuras 18 y 19, 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.

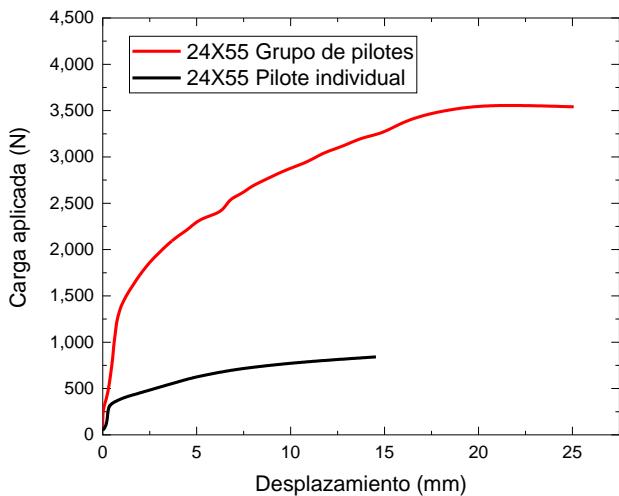


Figura 16. Curvas de carga y desplazamiento de las pruebas de carga a tensión axial, W24X55.

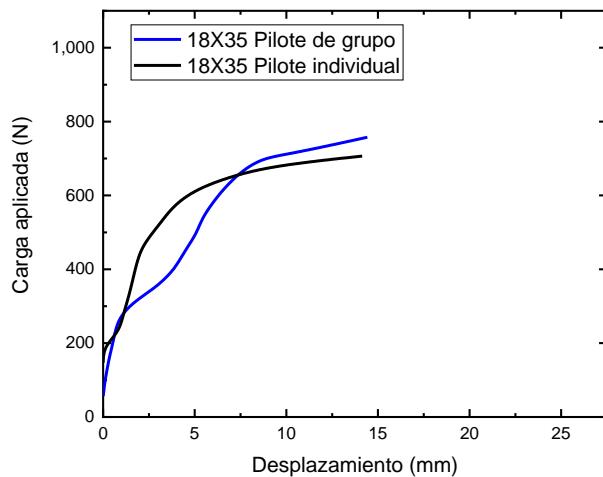


Figura 19. Comparación de las curvas a tensión de un pilote de grupo y el pilote individual, W18X35.

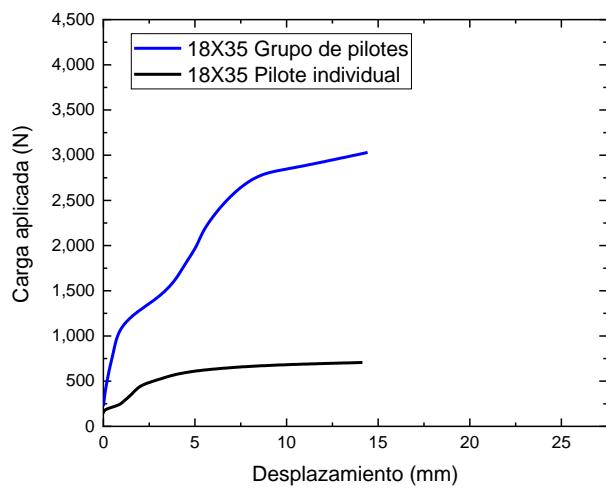


Figura 17. Curvas de carga y desplazamiento de las pruebas de carga extracción axial, W18X35.

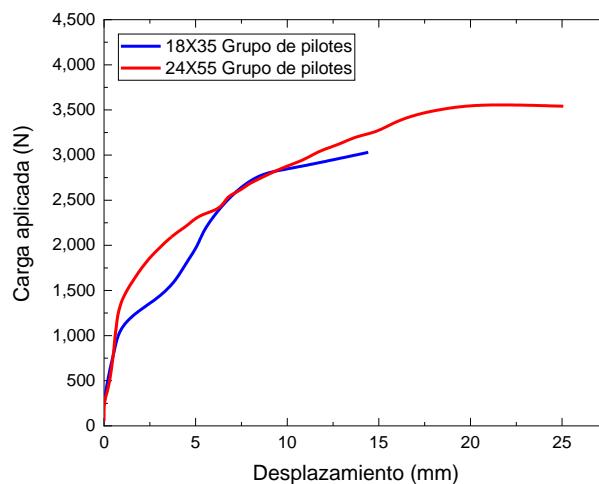


Figura 20. Comparación de curvas carga y desplazamiento de las pruebas de carga extracción axial para los grupos de pilotes W24X55 y W18X35.

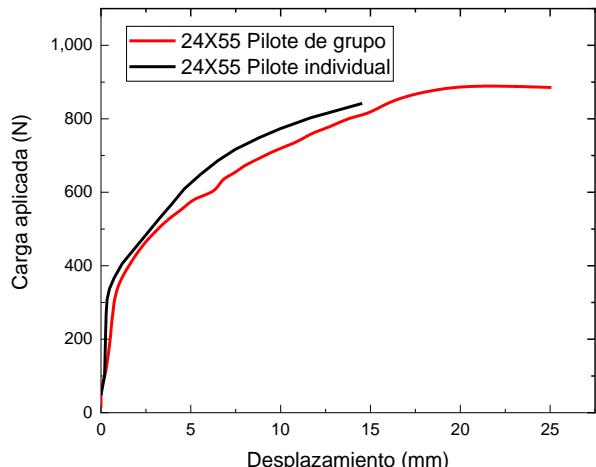


Figura 18. Comparación de las curvas a tensión de un pilote de grupo y el pilote individual, W24X55.

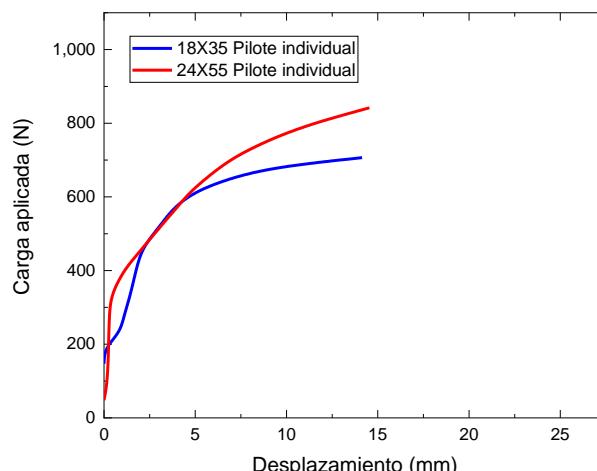


Figura 21. Comparación de curvas carga y desplazamiento de las pruebas de carga extracción axial para pilotes individuales W24X55 y W18X35.

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 20). Los pilotes individuales tienen el mismo comportamiento, la diferencia radica en que ambos pilotes W24X55 y W18X35 mostraron desplazamientos máximos similares (Figura 21).

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 22). 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, b_f , 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 23 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 21.

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.

4 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:



Figura 22. Fotografías de suelo adherido al pilote al extraerlo después de la prueba de carga a tensión.

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.

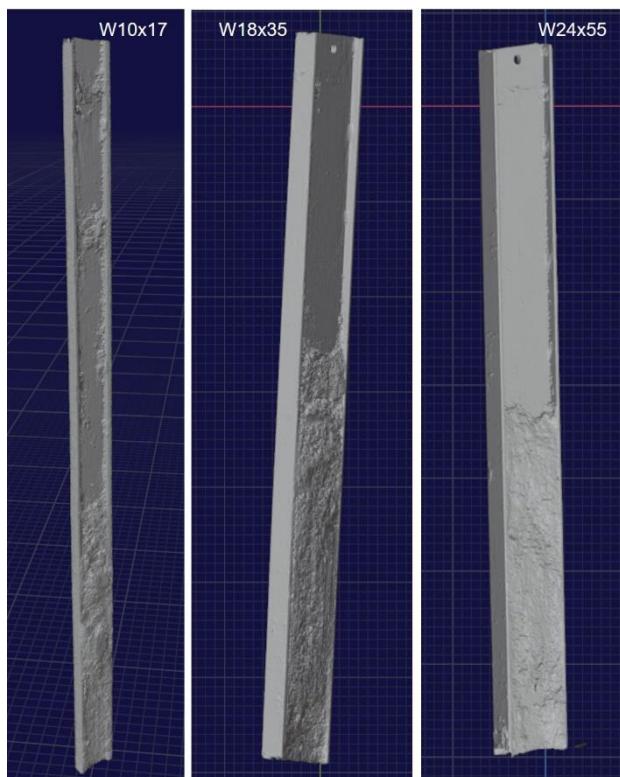


Figura 23. Imágenes obtenidas con el escáner 3D de los pilotes extraídos.

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.

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.
- 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.
- 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.
- 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.