XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/56

Ensayo de carga lateral en pilotes y analisis de la interacción suelo-pilote en arcilla de baja plasticidad

Dr. Ing. Alejandro Quiñonez
Orientador, FIUNA, Asunción, Paraguay, rquinonez@ing.una.py

Ing, Mauricio García Escribá
Estudiante, FIUNA, Asunción, Paraguay, mgarciaesciba@fiuna.edu.py

Ing. Oliver Vuyk Duré
Estudiante, FIUNA, Asunción, Paraguay, olivervuyk@fiuna.edu.py

MSc. Ing. Christian Vecca
Orientador, FIUNA, Asunción, Paraguay, crvecca@gmail.com

MSc. Ing. Nicolás Zabrodiec
Orientador, FIUNA, Asunción, Paraguay, nicozabro@gmail.com

Ing. Miguel Paats
Orientador, FIUNA, Asunción, Paraguay, mpaats9@hotmail.com

RESUMEN: En el presente trabajo se analizó la interacción suelo-pilote bajo la acción de una carga horizontal mediante un estudio experimental orientado a caracterizar el comportamiento geotécnico del sistema. Se realizó un ensayo de carga lateral in situ conforme a la ASTM D3966, sobre dos pilotes de hormigón armado de 45 cm de diámetro y 6 m de profundidad, separados 1 m entre sí, ubicados en el Campo Experimental CITEC–FIUNA (Paraguay), en un suelo arcilloso de baja plasticidad. La carga fue aplicada mediante gato hidráulico y los desplazamientos horizontales se registraron con tres relojes comparadores dispuestos en las caras opuestas de las cabezas de los pilotes; la fuerza aplicada se controló mediante manómetro y celda de carga. Se efectuaron predicciones teóricas y simulaciones numéricas para comparar la respuesta experimental con modelos analíticos, tales como el método de Broms y sowftwares especializados con formulaciones P-Y incorporadas. Durante el ensayo se produjo una falla estructural del hormigón en uno de los pilotes al alcanzar 84,3 kN, antes de la falla por desplazamiento global. Los resultados obtenidos muestran coherencia con las estimaciones previas y aportan información relevante para la calibración de modelos de comportamiento lateral en suelos arcillosos.

PALABRAS CLAVE: Interacción Suelo-Pilote, ensayo de carga lateral, pilote de hormigón armado, arcilla, método de broms.

ABSTRACT: In the present study, the soil–pile interaction under horizontal loading was analyzed through an experimental investigation aimed at characterizing the geotechnical behavior of the system. An in situ lateral load test was conducted in accordance with ASTM D3966 on two reinforced concrete piles, 45 cm in diameter and 6 m in length, spaced 1 m apart, located at the CITEC–FIUNA Experimental Field (Paraguay), in a low-plasticity clay soil. The load was applied using a hydraulic jack, and horizontal displacements were recorded with three dial gauges positioned on opposite faces of the pile heads; the applied load was monitored using a pressure gauge and a load cell. Theoretical predictions and numerical simulations were performed to compare the experimental response with analytical models, such as the method proposed by Bengt Broms, as well as specialized software incorporating p–y formulations. During the test, structural failure of the concrete occurred in one of the piles at 84,3 kN, prior to global displacement failure. The results show good agreement with prior estimates and provide relevant information for calibrating lateral pile behavior models in clay soils.

1 INTRODUCCION

La respuesta de un pilote sometido a cargas laterales está gobernada por un fenómeno de interacción suelo-estructura inherentemente complejo, en el cual la resistencia y la rigidez movilizadas dependen tanto de las características del pilote como del comportamiento del suelo que lo rodea. A diferencia de los problemas de carga vertical, la solicitación lateral induce deformaciones diferenciales a lo largo de la profundidad, con una movilización progresiva de la resistencia del suelo y una respuesta que no puede describirse mediante relaciones lineales simples. La rigidez del medio varía con la profundidad, con el nivel de deformación alcanzado y con las propiedades geotécnicas del suelo, las cuales suelen presentar una marcada heterogeneidad y estratificación en condiciones reales de obra.

Esta dependencia del comportamiento respecto del estado de deformación dificulta la representación del sistema suelo-pilote mediante modelos simplificados o parámetros únicos, ya que pequeñas variaciones en la rigidez del suelo o en las hipótesis adoptadas pueden generar diferencias significativas en los desplazamientos y esfuerzos internos estimados. En consecuencia, la predicción teórica del comportamiento lateral de pilotes presenta un grado de incertidumbre mayor que el asociado a otros tipos de solicitación, especialmente cuando el diseño está controlado por criterios de servicio, como desplazamientos o rotaciones admisibles.

En este contexto, los ensayos de carga lateral realizados directamente en campo son importantes como referencia experimental, al permitir la observación directa de la respuesta real del sistema suelo-pilote bajo condiciones representativas. Estas pruebas proporcionan información confiable sobre la relación entre carga lateral y desplazamiento, la rigidez inicial del sistema y su evolución con el incremento de la carga, así como sobre la influencia de la estratigrafía del suelo en el comportamiento global del pilote. De este modo, los ensayos experimentales no solo permiten evaluar la capacidad y las deformaciones producidas en el pilote ensayado, sino que constituyen una base esencial para el contraste y la validación de los modelos de análisis utilizados en la práctica profesional, contribuyendo a una mejor comprensión del comportamiento lateral de pilotes y a la reducción de la incertidumbre en su diseño.

2 METODOLOGÍA

2.1 Descripción General y Antecedentes del Sitio de Ensayo

Para la prueba de carga lateral, se analizarán pilotes ya construidos con fines académicos para la tesis de maestría “Estudio experimental de la fricción lateral en pilotes excavados” (2021) realizada por el Msc. Ing. Christian Vecca; cuyo objetivo general fue realizar un estudio de la fricción lateral en pilotes excavados y su contribución a la resistencia total del pilote; en donde estos pilotes, denominados P1 y P2, fueron diseñados y construidos para ser pilotes de reacción en una prueba de carga vertical, en la que recibieron una carga a tracción y no llegaron a la falla.

P1 y P2 son pilotes perforados y tienen un diámetro de 45 cm, una longitud efectiva de 6 m y por encima cuentan con un cabezal de 50x70x100 [cm]. Están separados entre sí una distancia de 1 m. Para su construcción se utilizó un hormigón dosificado en planta con una resistencia característica de diseño de 25 MPa. Se añadió un plastificante en la obra para aumentar la fluidez, resultando en un asentamiento mayor. El acero utilizado tenía una resistencia característica de 500 MPa[1]. Cada pilote cuenta con 6 barras longitudinales de 16 mm y estribos helicoidales de 6 mm cada 20 cm.

[1] Corresponde a un acero de dureza natural grado ADN 500, cuyas propiedades mecánicas cumplen con las normativas regionales para armaduras de hormigón armado.

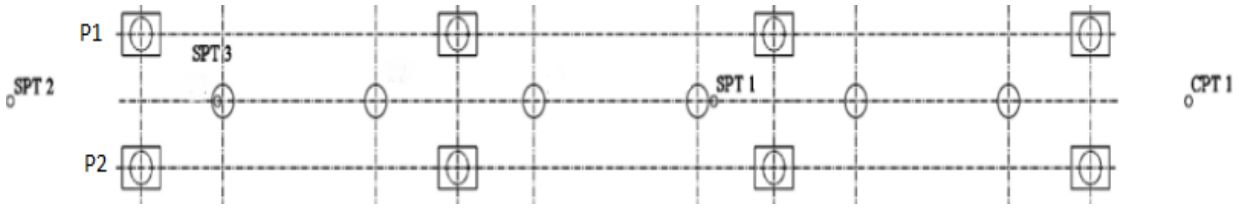


Figura 1: Esquema general de los pilotes existentes y ubicación de los sondeos, fuente Vecca, 2021.

2.2 Estudios Geotécnicos

Para la caracterización del suelo, se han utilizado los estudios de suelo existentes del campo experimental en cuestión (SPT y CPTU). El suelo consiste en una arcilla arenosa rojiza y homogénea, de baja plasticidad (ver Tabla 1). También se dispuso de un estudio CPT existente2, útil para determinar y contrastar el parámetro S_u (ver Tabla 2).

Tabla 1: Valores de N_{SPT} en el sitio de ensayo

Estrato	Descripción del suelo	Profundidad (m)	N_{SPT} P1	N_{SPT} P2	N_{SPT} P3
1	Arcilla arenosa de color marrón rojizo, baja consistencia	0,50 - 2,00	4 - 6	4 - 5	0 - 1
2	Arcilla arenosa marrón rojiza, consistencia media	2,00 - 4,00	4 - 10	5 - 8	2 - 7
3	Arcilla arenosa marrón rojiza, medianamente firme	4,00 - 6,50	6 - 10	7 - 13	7 - 14
4	Arcilla arenosa muy firme	6,50 - 8,50	30 - >50	15 - 40	3 - 15
5	Estrato competente (muy firme a duro)	> 8,50	—	> 50	12 - >50

Tabla 2: Valores de CPT1 en el sitio de ensayo

Prof (m)	q_c (kPa)	q_c (MPa)	S_u (kPa)
0	0	0	0,00
1	1040	1,04	34,07
2	900	0,9	28,80
3	2000	2	64,87
4	2600	2,6	84,27
5	3000	3	97,00
6	3000	3	96,40

2.3 Procedimiento del Ensayo

Para este ensayo, se toma como guía de diseño la norma ASTM D3966 - 07, la cual establece los métodos de prueba estándar para medir la deflexión lateral de cimentaciones profundas (pilotes) sometidas a cargas laterales. Estos métodos son aplicables a pilotes individuales o grupos de pilotes. En el caso específico de un ensayo con un par de pilotes enfrentados, se define que ambos podrán ser instrumentados para evaluar su interacción bajo carga lateral. En esta norma se expone la instrumentación y procedimientos específicos para

[2] El ensayo de penetración de cono (CPT) fue ejecutado siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D5778, permitiendo una lectura continua de la resistencia de punta (q_c) y la fricción lateral (f_s).

pilotes enfrentados, planteándose un esquema muy similar al que podemos obtener en el campo experimental CITEC[3].

El esquema consiste en la aplicación de una carga lateral por un gato entre los cabezales enfrentados, empujándose mutuamente uno al otro por medio de un gato hidráulico. Sobre los instrumentos necesarios para la realización de este ensayo, se sugieren manómetros, relojes comparadores, transductores de desplazamiento lineal; para un sistema de cargas con magnitudes superiores a 980 kN es obligatorio colocar una celda de carga, mas no así para cargas menores. La norma también propone un procedimiento de carga estándar (Procedimiento A) con registro de intervalos conforme a la cláusula indicada (lecturas inmediatamente antes/ después de cada incremento y disminución; lecturas intermedias cada 5 minutos; durante carga total lecturas cada ≥ 15 min; lecturas a 15 y 30 min tras descarga; si ocurre falla registrar inmediatamente antes de la primera disminución). El programa de escalones de carga utilizado consistió en los siguientes escalones de carga: 1.º escalón: 24,5 kN; 2.º escalón: 49,0 kN; 3.º escalón: 73,5 kN; 4.º escalón: 98,0 kN (carga de diseño, según modelos teóricos aplicados previamente), planificación para continuar hasta 196 kN si las condiciones lo permitían.

2.4 Instrumentación y Disposición de Equipos

Los instrumentos utilizados fueron un gato hidráulico, extensores de carga, un manómetro, una celda de carga con su lector electrónico, relojes comparadores con sus soportes, placas para distribución de carga y perfiles de acero para establecer los apoyos de estos equipos.

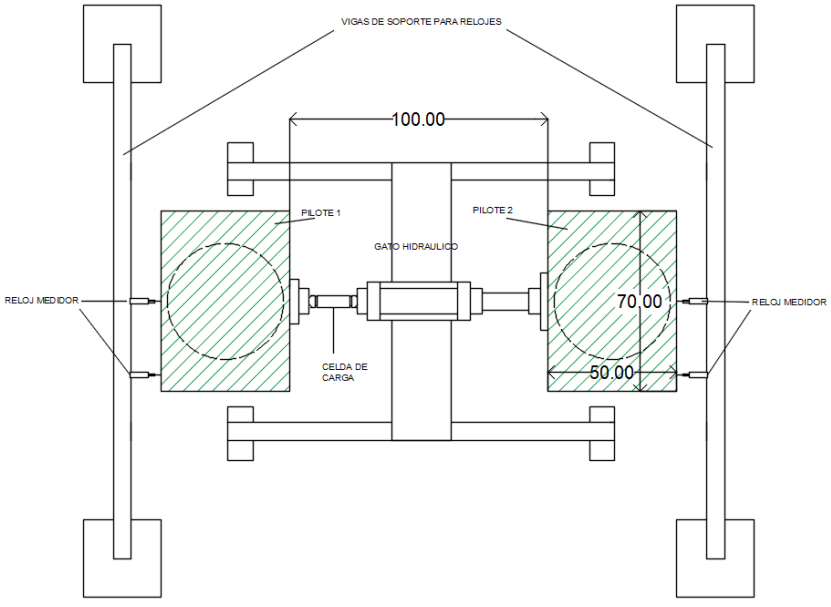


Figura 2: Esquema final de ensayo, fuente propia.

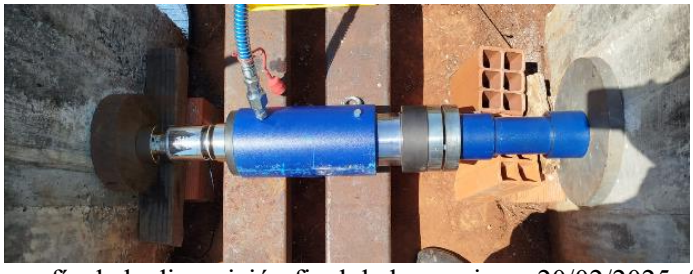


Figura 3: Fotografía de la disposición final de los equipos, 20/02/2025; fuente propia.

[3] La configuración de pilotes enfrentados permite aprovechar la reacción de un pilote contra el otro, eliminando la necesidad de un sistema de anclaje externo o vigas de reacción adicionales.



Figura 4: Fotografía del montaje de los relojes comparadores, 20/02/2025; fuente propia.

Para la lectura de las deformaciones, se han colocado tres relojes comparadores en cada cara posterior de cada cabezal. Estos estaban dispuestos de forma simétrica o espejo, con la intención de medir idénticamente a cada pilote y también de advertir cualquier asimetría o aplicación descentrada de la carga. Al pilote P1 se le asignó dos relojes comparadores analógicos y uno digital (lecturas P1A1, P1A2 y P1D1 respectivamente) y al pilote P2, dos relojes comparadores digitales y uno analógico (lecturas P1A1, P1A2 y P1D1 respectivamente). Este sistema de referencia facilitó y ordenó las lecturas obtenidas.

3 RESULTADOS DEL ENSAYO

3.1 Registro de Lecturas

En esta sección se detallan los datos obtenidos durante la ejecución del ensayo de carga estática in situ, realizado en el campo experimental del CITEC. El proceso de recolección de datos se llevó a cabo de manera sistemática, registrando las deformaciones y la carga aplicada en intervalos de tiempo controlados.

Una vez finalizada la etapa de recolección de datos en campo, se procedió a la sistematización y procesamiento de las lecturas de carga y deformación. Este procedimiento permitió transformar los registros tabulares en curvas de comportamiento mecánico, facilitando la identificación de la carga crítica y los patrones de asentamiento.

A continuación, una serie de gráficos de las deformaciones en mm para un conjunto de 3 (tres) relojes comparadores obtenidas en cada pilote, en la cual se aprecia la diferencia en desplazamientos de los cabezales de los mismos[4].

Tabla 3: Resultados obtenidos en el ensayo.

Nº	1			2			3				Falla
Carga	24,5 kN			49 kN			73,5 kN				84,3 kN
P1A1	0,79	1,83	1,85	2,97	3,92	4,11	11,8	14,9	15,6	16,3	34,02
P1A2	0,64	0,68	0,7	2,47	3,27	3,44	9,97	12,6	13,2	13,8	<25
P1D1	0,79	0,83	0,85	3,02	4	4,2	12	15	15,1	16,4	34,96
P2D1	0,92	0,98	1	3,2	3,56	3,71	8,49	9,99	10,2	10,6	13,22
P2D2	0,77	0,83	0,84	2,72	3,05	3,17	7,28	8,57	8,81	9,07	11,4
P2A1	0,93	1	1,01	3,22	3,6	3,74	8,57	10,1	10,3	10,7	13,31

[4] Esta divergencia puede atribuirse a ligeras variaciones en la compactación local del suelo circundante a cada pilote o a la anisotropía propia del depósito arcilloso en el campo experimental.

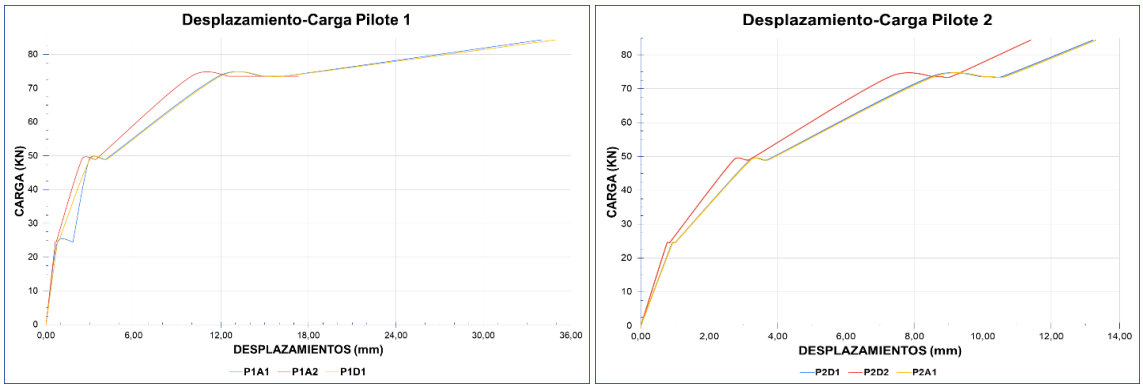


Figura 5: Grafico Desplazamiento-Carga de relojes, a la izquierda el Pilote 1 y a la derecha el Pilote 2

4 MODELOS TEÓRICOS

4.1 Datos de entrada

El análisis teórico se realizó considerando un pilote de hormigón armado de 0,45 m de diámetro y 6,0 m de longitud, con condición de cabeza libre. El momento de inercia fue calculado a partir de la geometría nominal de la sección[5], adoptándose inicialmente un comportamiento lineal elástico.

En primer lugar se estimó el momento resustente M_y según la hipótesis elástica, considerando el módulo resistente compuesto del hormigón y del acero, se obtuvo M_y = 120 kN.m. Posterior a eso, se obtuvo el valor de M_y a partir del equilibrio simplificado de fuerzas internas resultando un valor de M_y =80 kN.m; valor adoptado para el análisis comparativo por representar de forma más realista el mecanismo de falla observado. La resistencia al corte no drenado se definió mediante correlaciones empíricas basadas en resultados N_{SPT} y CPTu, adoptándose valores representativos de S_u=52 kPa y S_u=67 kPa para la realización de los modelos comparativos, ambos provenientes de relaciones con los estudios N_{SPT} y CPTu respectivamente.

$$M_y = S * F_{eq} \quad (1)$$

$$M_y = A_s * z * F_y \quad (2)$$

$$S_u = N_k * N_{60} \quad (3)$$

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_k} \quad (4)$$

4.2 Resultados según el método de Broms

Se obtuvieron los siguientes valores de carga última según el método de Broms[6]:

Tabla 4: Resultados de la carga última según el método de Broms.

M_y [kN.m]	S_u [kPa]	Q_u [kN]
80	60	72,9
120	60	97,2

[5] Se utilizó el momento de inercia de la sección bruta (I_g), asumiendo que para los niveles de carga de servicio el hormigón se mantiene mayoritariamente sin fisurar en la zona de máximos momentos.

[6] El método de Broms asume un comportamiento rígido-plástico del suelo, por lo que sus resultados suelen ser más conservadores en comparación con modelos que consideran la rigidez variable del terreno.

4.3 Resultados mediante formulación p–y

El pilote fue modelado mediante curvas p–y para arcillas bajo carga estática, implementadas en el software especializado (LAP), con métodos p-y incorporados, según la formulación propuesta por Matlock (1970) y posteriormente adoptada por la API RP-2A para el análisis de pilotes sometidos a cargas laterales. Se evaluaron los resultados con la inserción de los parámetros geotécnicos definidos previamente, con ciertos ajustes y las mismas condiciones geométricas y estructurales consideradas en el análisis de Broms.

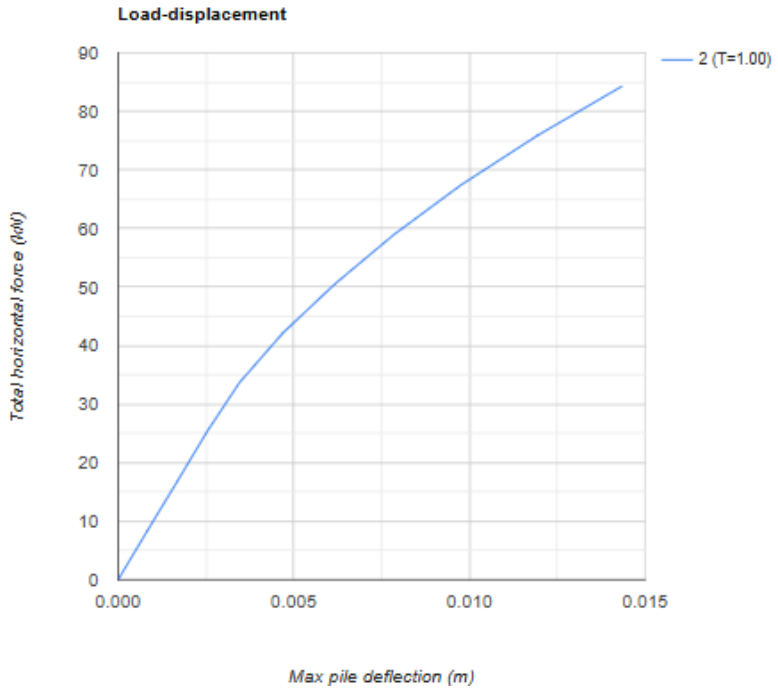


Figura 6: Grafico representativo del modelo, método Arcillas API con S_u=70 kPa; fuente propia.

5 CONCLUSIONES

5.1 Respecto a las Condiciones y Resultados Logrados en Campo

Las mediciones de desplazamiento en los relojes instalados a la misma altura arrojaron lecturas muy similares en ambos pilotes, lo que permite concluir que la carga lateral fue aplicada de manera centrada y sin presencia de torsión o inclinación en el eje de carga. Asimismo, se observó que los relojes superiores registraron mayores desplazamientos que los inferiores, tendencia que es consistente con el comportamiento flexional esperado en un sistema empotrado-libre, donde la deflexión máxima ocurre en el punto superior.

La relación carga-desplazamiento no fue lineal, describiendo una curva de rigidez decreciente. A partir de las 73,5 kN se detectó un incremento acentuado en los desplazamientos, lo cual sugiere la formación de una rótula plástica en las inmediaciones de la profundidad crítica, en concordancia con los fundamentos teóricos. Al alcanzar una carga de 84,3 kN, se produjo una rotura abrupta en la unión pilote-cabezal del pilote nro. 1, marcando el colapso del sistema. Este punto de falla fue identificado por un ruido característico de rotura y una caída súbita de la carga registrada en la celda.

En términos generales, el comportamiento global observado coincide con lo esperado en pilotes excavados en arcillas de baja plasticidad. Inicialmente, la resistencia proviene de la cohesión no drenada del suelo, pero al tratarse de un pilote largo, la respuesta final del sistema pasa a estar controlada por la resistencia a la flexión del elemento estructural, la cual termina condicionando el colapso global.

5.2 Respecto al Diseño Analítico y Método Numérico Implementado

Para el diseño de pilotes sometidos a carga lateral, resulta acertado y conveniente utilizar el método de equilibrio de fuerzas internas para la obtención del momento último de la sección.

El método empírico para la obtención de la resistencia al corte no drenada C_u o S_u, proporcionó un valor fiable para un diseño rápido y simplificado del sistema. La aplicación del modelo computacional (LAP) a través del método de Arcillas API con S_u = 70kPa, valor promedio dado por la correlación con los resultados del estudio CPTu, es coherente con los resultados obtenidos en campo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los orientadores por la excelente predisposición, el constante apoyo técnico y la valiosa guía académica brindada durante todas las etapas de esta investigación. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a la FIUNA por facilitar el espacio y los equipos necesarios para la realización de los ensayos experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

ACI Committee 318 (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*. American Concrete Institute.

American Petroleum Institute (2014). *API RP 2GEO: Geotechnical and Foundation Design Considerations.* American Petroleum Institute, Washington.

ASTM International (2018). ASTM D3966: *Standard Test Method for Deep Foundations Under Lateral Load*. West Conshohocken, PA.

Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design*. 5th ed. McGraw-Hill.

Das, B. M. (2019). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. 8ª ed. Cengage Learning.

LAP Geocalcs (s. f.). *Manual de Usuario LAP*.

Lunne, T., Robertson, P. K., Powell, J. J. M. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Blackie Academic & Professional.

Pfeil, W. (2009). *Hormigón armado*. 12ª ed. Gustavo Gili.

Poulos, H. G., Davis, E. H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*. John Wiley & Sons.

Reese, L. C., Cox, W. R., Grubbs, B. R. (1974). Field testing of laterally loaded piles in sand. *Géotechnique*, 24(2), p. 147–163.

Robertson, P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), p. 151–158.

Robertson, P. K. (2010). Soil behaviour type from the CPT: An update. *Geotechnical Engineering Journal*, 47(3), p. 191–206.

Schnaid, F. (2000). *In Situ Testing in Geomechanics: The Main Tests*. Rotterdam: A.A. Balkema.

Vecca Vallejos, C. R. (2021). *Estudio experimental de la fricción lateral en pilotes excavados*. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Asunción, Paraguay.