

Mechanical Device for the Application of Lateral Loads on Deep Foundations at a Small Scale

Larisa Almengor¹, Saddy Li¹, Roberto Miranda¹, Krysna Samudio¹ and Francisco Grajales-Saavedra, Ph.D.¹

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Republic of Panama, larisa.almengor@utp.ac.pa, saddy.li@utp.ac.pa, roberto.miranda2@utp.ac.pa, krysna.samudio@utp.ac.pa, francisco.grajales@utp.ac.pa

Abstract– The analysis and design of deep foundations under lateral loading has been a topic of continuous improvement since the first developments around 1960. The maritime industry in the Republic of Panama makes significant use of this foundation system for infrastructure such as ports and berths. This paper presents results from a classroom research project in which a classroom prototype of a lateral load application device loading deep foundations has been developed. The experiment involved experimental tests of three piles with different diameters, measuring load and deflection at the top of the pile. Previous results, presented in a companion paper have shown that the experimental data is somewhat in agreement with basic theoretical methods, such as Broms (1964) and Reese et. al. (1974). For this paper, a numerical simulation has been developed using existing methodologies available in the literature and by the use of commercial-grade software. Comparison between experimental and numerical data show that the prototype is able to produce a load-deflection behavior similar to that of a laterally loaded pile, but at a small scale. Due to the artisan nature of the prototype, there are some compromises regarding the accuracy of the data, aspect which makes the prototype not suitable for research purposes. However, the data obtained is considered to be adequate for use as an academic tool for the classroom.

Keywords–Sand, Capacity, Lateral Load, Modeling, Piles

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.349>

ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

Dispositivo Mecánico para la Aplicación de Cargas Laterales en Cimientos Profundos a Pequeña Escala

Larisa Almengor¹, Saddy Li¹, Roberto Miranda¹, Kryсна Samudio¹ and Francisco Grajales-Saavedra, Ph.D.¹

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Republic of Panama, larisa.almengor@utp.ac.pa, saddy.li@utp.ac.pa, roberto.miranda2@utp.ac.pa, kryсна.samudio@utp.ac.pa, francisco.grajales@utp.ac.pa

Resumen– El análisis y diseño de fundaciones profundas bajo cargas laterales ha sido un tema de mejoramiento continuo desde su introducción en los años 1960. La industria marítima en la República de Panamá hace uso significativo de este sistema de fundaciones para infraestructuras como puertos y muelles. Este artículo presenta resultados de un proyecto de investigación de clase en el cual un prototipo pedagógico de un dispositivo de aplicación de carga lateral en pilotes fue desarrollado. Se realizaron ensayos experimentales en pilotes de madera de tres diámetros distintos, midiendo en cada caso la carga y la deflexión en la parte superior del pilote. Los resultados previos presentados en un artículo paralelo han mostrado que la data experimental se encuentra relativamente en concordancia con métodos teóricos, como los son el método de Broms (1964) y el método de Reese et. al. (1974). Para este artículo, se ha desarrollado una simulación numérica utilizando softwares de grado comercial. Las comparaciones entre la data experimental y numérica muestran que el prototipo es capaz de producir un comportamiento carga-deflexión similar a aquel de un pilote bajo carga lateral, pero a pequeña escala. Debido a la naturaleza artesanal del prototipo, existen ciertos sacrificios relacionados a la precisión de la data, aspecto el cual produce que el prototipo no sea adecuado para propósitos de investigación. Sin embargo, la data obtenida es considerada adecuada para el uso como una herramienta de salón de clases.

Palabras Claves– Arena, Capacidad, Carga Lateral, Modelación, Pilotes.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis de pilotes sometidos a cargas laterales es un aspecto de suma importancia dentro del diseño de estructuras tanto convencionales como también infraestructura marítima. Este artículo presenta resultados de una investigación experimental realizada con la intención de simular el comportamiento de cimientos profundos ante la aplicación de cargas monotónicas laterales. Un primer artículo ha documentado la primera fase de esta investigación [1].

El objetivo general de esta investigación es realizar una modelación experimental del comportamiento carga-deflexión de un pilote de madera a pequeña escala y comparar los resultados con aquellos obtenidos analíticamente mediante teorías de análisis en estado límite. A partir de los resultados de este trabajo, se podrán realizar comparaciones y calibraciones de modelos numéricos bajo distintos tipos de carga y con diversos suelos.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

El estudio aquí presentado comprende la validación de datos experimentales obtenidos mediante el dispositivo mecánico y predicciones numéricas realizadas con paquetes de software comercial. Se presenta una revisión de los aspectos fundamentales de la literatura como también un resumen de los estudios anteriormente documentados [1]. Igualmente, se incluye una explicación de la metodología de investigación utilizada y el análisis y discusión de los resultados obtenidos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

A. Cimientos Profundos

Los cimientos profundos son por lo general elementos constructivos similares a columnas, los cuales se instalan de forma vertical o inclinada con el fin de transmitir las cargas hasta un estrato resistente del suelo. [2]. La respuesta de los pilotes es más eficaz a la acción de cargas axiales, sin embargo, casi todos los pilotes son propensos a ser sometidos en algún momento a cargas laterales y momentos derivados de los empujes de viento, efectos sísmicos y cargas hidrodinámicas (e.g. oleaje, corrientes marinas y mareas) [3].

Tal como se ha descrito, estas fuerzas o cargas son producto de distintos eventos de tipo ambiental, los cuales a consecuencia del cambio climático se han exacerbado en años recientes. Existe, por lo tanto, una creciente necesidad de estudiar en mayor detalle el comportamiento de infraestructuras críticas para el funcionamiento de asentamientos humanos, muchas de las cuales están cimentadas sobre pilotes (Fig. 1).

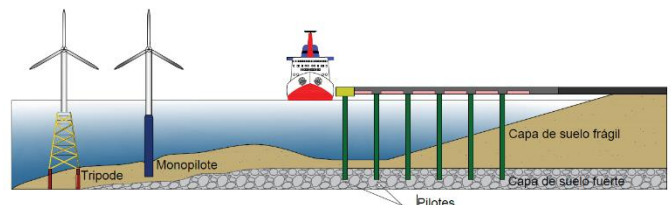


Fig. 1 Esquema de la utilización de pilotes en infraestructura costera y mar afuera.

B. Industria Marítima en Panamá

En la República de Panamá, la industria marítima representa uno de los pilares más importantes en la economía, siendo una de las actividades económicas con un potencial de crecimiento considerable.

Las terminales portuarias privadas poseen planes de mantenimiento establecidos los cuales aseguran el funcionamiento y mantenimiento oportuno. Sin embargo, los

puertos estatales carecen de los mismos, razón por la cual la infraestructura portuaria tiende a presentar un deterioro tangible, el cual puede en un momento dado afectar la funcionalidad del puerto.

Una gran porción de los puertos estatales posee muelles de pilotes para el atraque de embarcaciones. A lo largo de los años, se ha observado que los pilotes de muelles presentan evidencias de deterioro debido a falta de mantenimiento adecuado. Dicho deterioro, sumado a la agresividad de las fuerzas laterales impuestas por el ambiente marino, puede en un momento dado producir fallas no deseadas en el sistema de cimientos.

Las Figuras 2 (a-d) muestran un resumen gráfico de las condiciones de algunos muelles en el Puerto de Aguadulce. Se pueden observar fenómenos químicos como lo son carbonatación, ataque de cloruros y eflorescencia. Se observa también el desgaste en los pilotes debido al impacto de olas en la zona de salpicadura. Adicionalmente, algunos pilotes se encuentran severamente afectados debido al impacto de embarcaciones al momento del amarre [2].



Fig. 2 Patologías estructurales en puerto de Aguadulce, República de Panamá.

Pese a ser un punto estratégico para la cadena de suministros, se pueden nombrar una serie de daños estructurales observables en el muelle. Dichas patologías pudieran en algún momento dado poner en peligro el funcionamiento del muelle, debido a que en la mayoría de los casos reducen el desempeño estructural de los materiales utilizados.

C. Normativas para el Diseño de Cimientos Profundos bajo Cargas Laterales

A nivel internacional, no existe una normativa unificada para el análisis y diseño de pilotes bajo cargas laterales, las cuales son típicamente producidas por viento, sismos, oleaje, corrientes marinas y mareas. Existen normas aplicables a determinados países, como es el caso de las disposiciones del Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum

Institute, API), las cuales son utilizadas en Estados Unidos de América [2].

Sin embargo, dichos lineamientos fueron elaborados en base a resultados de investigaciones en suelos propios de dicho país, razón por la cual no son enteramente aplicables a otras localidades. En el caso de la República de Panamá, el Reglamento Estructural Panameño no establece ningún criterio para el análisis, diseño y evaluación de pilotes sometidos a fuerzas laterales, lo cual representa una limitante a la hora de evaluar la capacidad y desempeño de pilotes sometidos principalmente a dicho tipo de fuerzas, como es el caso de los pilotes en ambiente marino.

El diseño de cimentaciones con pilotes sometidas a cargas laterales debe satisfacer los criterios de carga admisible en el suelo y en los pilotes, y de deflexión tolerable de la estructura que soportan. La respuesta mecánica de pilotes sometidos a carga lateral está fuertemente influenciada por fenómenos de interacción suelo-estructura que se desarrollan en la superficie del pilote, por la relación entre las rigideces relativas entre el suelo y el pilote y por el rango de cargas al que está sometido el mismo. Debido a que la respuesta del sistema suelo-pilotes es no lineal, incluso en el rango de cargas admisibles de trabajo, es importante que el diseño de pilotes sometidos a carga lateral se base en métodos de análisis que modelen el comportamiento no lineal del sistema [2].

A lo largo de los años, se han realizado múltiples investigaciones para estudiar el comportamiento de pilotes bajo carga lateral [4][5][6][7][8][9][10]. Para el análisis y el diseño de grupos de pilotes sometidos a carga sísmica, el procedimiento más recomendable consiste en construir los modelos analíticos en un software que simule tanto el comportamiento no lineal del suelo de cimentación para carga axial como para carga lateral, analizando la estructura de cimentación por procedimientos de elementos finitos. La calibración de dichos modelos debe ser realizada mediante comparación de los mismos contra pruebas de laboratorio o a escala, de modo que se pueda definir con detalle la geometría y propiedades materiales de los mismos.

D. Aprendizaje por experimentación

El aprender haciendo es una ventaja significativa que tienen los estudiantes, ya que les permite integrar conocimientos y crear diferentes expectativas profesionales, de esta manera es posible desarrollar un criterio propio basado en el análisis y en la observación forjando así un profesional competitivo que sea capaz de buscar soluciones a los diferentes problemas que puedan surgir en el campo laboral.

El desarrollo pedagógico es crucial para la educación ya que de esta manera se puede hacer llegar los conocimientos a todo el alumnado, como es de conocimiento, cada persona aprende de distintas maneras, por ende, es necesario implementar estrategias que permitan que el estudiante desarrolle su potencial y autonomía con el aprendizaje adquirido mediante el desarrollo de proyectos.” [1]

En este sentido, el estudio contenido en este artículo propone la construcción de un prototipo de dispositivo para la

aplicación de cargas laterales en fundaciones profundas. Lejos de ser un dispositivo aplicable a investigación científica, se considera que el aparato propuesto puede ser utilizado exitosamente como herramienta complementaria para el aprendizaje de los conceptos teóricos típicamente asociados con el cálculo de capacidades y deflexiones de pilotes bajo carga lateral.

E. Resultados de Estudios Previos (Almengor, et al) [1]

Los resultados a ser presentados en la sección siguiente corresponden a una continuación de un artículo previamente publicado por Almengor et al [1].

En dicho estudio, los autores realizaron la construcción y calibración preliminar del dispositivo. El suelo utilizado fue estudiado utilizando los estándares internacionales aplicables, obteniendo una clasificación de SP-SM (arena mal graduada con limo), la cual se presenta en la Fig 3.

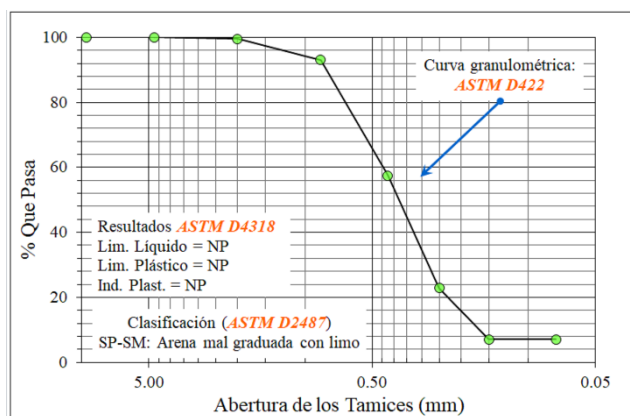


Fig. 3 Gráfico del análisis granulométrico.

En las pruebas a escala, se registraron 9 mediciones para tres diámetros distintos (Pilote A = 0.015m, Pilote B = 0.019m y Pilote C = 0.022m), en la cual 2 de ellas fueron de carga y 1 carga y descarga. El procedimiento se encuentra ampliamente explicado en [1]. En resumen, el pilote a microescala era cargado hasta cierto peso para luego descárgalo y volverlo a cargar con el fin de evaluar la pendiente del rango elástico en el sistema.

A partir del peso acumulado en el sistema se obtuvieron las deformaciones para cada uno de los pilotes. En este estudio, la capacidad fue estimada como la carga correspondiente al límite de proporcionalidad de la pendiente inicial de la prueba. Sin embargo, los autores reconocieron las limitaciones e incertidumbre en lo referente a la selección de un valor de carga de máxima para este tipo de problema.

Para efectos de la verificación de resultados se utilizó el método de Broms [11] para calcular la capacidad del pilote. Los autores mencionaron que el método de Broms fue elaborado para el cálculo de capacidad de pilotes en escala real, con lo cual se consideraba la posibilidad de que existieran diferencias con el experimento realizado.

Adicionalmente, otros autores puntualizaron que los resultados de dicho método suelen predecir de manera conservativa la capacidad. Los resultados del método suelen ser aproximadamente 50% menos que las capacidades medidas en pruebas en las cuales se lleva el pilote a falla. [12].

Los resultados obtenidos en el estudio inicial permitieron constatar preliminarmente que los resultados experimentales son válidos, siempre y cuando la capacidad sea definida por el límite de proporcionalidad, tal como se muestra en la Tabla I.

TABLA I
COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANALÍTICOS

Parámetros	Pilote A	Pilote B	Pilote C
Promedio Experimental	17.00 N	20.00 N	16.25 N
Predicción Analítica (Broms)	16.84 N	17.08 N	19.36

Las conclusiones del estudio arrojaron que resulta complicado definir con claridad la capacidad de un pilote en suelo granular. Esto fue constatado mediante revisión de literatura en la cual algunos autores definen capacidad como la carga equivalente a 0.1D de deformación horizontal, mientras que otros utilizan el límite de proporcionalidad como la capacidad del pilote.

Adicionalmente, la precisión de las mediciones obtenidas es cuestionable, ya que dependían en gran medida del ojo humano lo cual introduce un cierto grado de subjetividad en las lecturas. Esto hace necesario la verificación de los datos obtenidos utilizando metodologías analíticas mas adecuadas, las cuales puedan capturar de mejor forma el comportamiento carga-deflexión del suelo.

III. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN Y MATERIALES

A. Metodología de Investigación

La metodología utilizada para esta investigación se presenta de manera gráfica en la Fig. 4. Se observa que contiene tantos componentes de modelación física, experimentos de laboratorio como métodos analíticos.

B. Materiales

Para el desarrollo de esta investigación se fabricó un dispositivo mecánico sencillo [1] para la aplicación de carga lateral en pilotes. La Fig. 5 muestra un diagrama en tres dimensiones del prototipo construido. Se aprecian indicados los componentes claves del mismo.

Para el diseño se tomaron en cuenta la disponibilidad de los materiales, dimensiones manejables y una estructura sencilla y funcional en el aparato. Estas consideraciones iban ligadas a factores como la facilidad de construcción, los recursos limitados (materiales de fácil acceso), y el mecanismo de

aplicación de carga al instrumento. Se considera que los factores anteriores son imprescindibles para efectos de la reproducibilidad del prototipo.

El artefacto diseñado (fig. 6) cuenta con un soporte (una mesa) para brindar apoyo a los componentes superiores, un cajón de madera contrachapada (“plywood”) de grado marino de 0.5 x 0.5 x 0.5 m, un cuadro de madera de 0.15 x 0.10 x 1 m en el cual se colocaron el juego de poleas, y la carga sería aplicada poco a poco provocando variaciones de carga de 0.1 lb en el plato de pesos y midiendo el desplazamiento producido por el pilote.

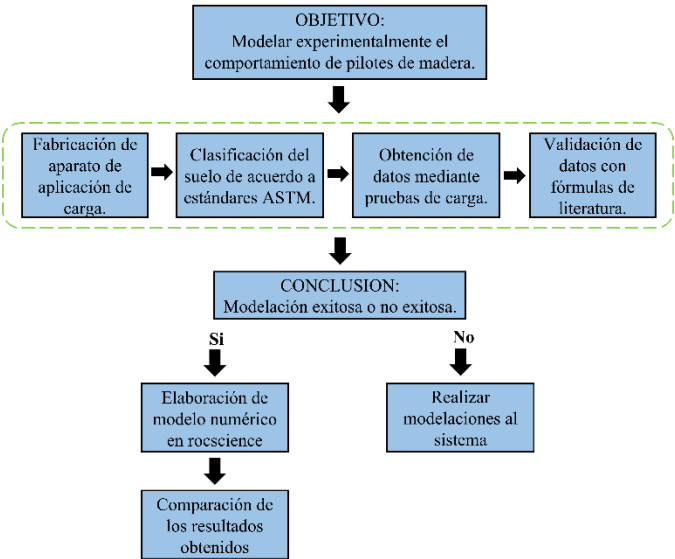


Fig. 4 Metodología de Investigación

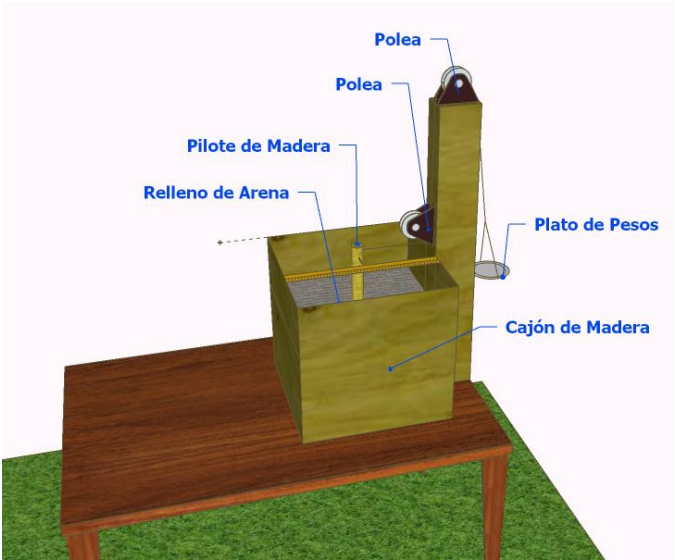


Fig. 5 Diagrama en 3D del aparato para pilotes de carga lateral.

Para esta primera versión del aparato, se dificultó la obtención de un deformímetro digital o mecánico, este

instrumento consistía en medir pequeñas deformaciones lineales. El aparato se construyó con los materiales mostrados en la Tabla II.



Fig. 6 Construcción y producto final del dispositivo para pilotes de carga lateral. [1]

TABLA II
MATERIALES UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DEL APARATO

#	Materiales	Dimensión
1	Cajón de plywood marino	0.5 x 0.5 x 0.5 m
2	1 polea	7 cm
3	1 polea	6 cm
4	1 cinta métrica	1 m
5	1 cuadro de madera	0.15 x 0.10 x 1 m
6	Pilote A: tarugo de madera	0.015 x 0.45m
7	Pilote B: tarugo de madera	0.019 x 0.45m
8	Pilote C: tarugo de madera	0.02 x 0.45m

C. Método Analítico de Reese et al. [13]

Los análisis numéricos utilizados para verificar los resultados fueron realizados utilizando el paquete RS Pile del software RocScience Academic Bundle. Para el caso en estudio, se utilizaron las ecuaciones presentadas por Reese et al [ref] para el análisis de fundaciones profundas bajo cargas laterales. Dichas ecuaciones han sido ampliamente validadas a

lo largo de los años y son utilizadas como estándar para el diseño de pilotes bajo carga lateral a nivel mundial.

Cuando se desarrolla un análisis de pilotes cargados lateralmente mediante curvas p-y, aplicando relaciones no lineales, el parámetro principal a tomar en consideración es el módulo de reacción. RS Pile define este módulo de reacción (Epy) usando la secante de la curva p-y, el cual está en función tanto de la deflexión del pilote (y) como de la profundidad debajo de la superficie del suelo (z).

El método de curvas p-y para arenas de Reese, et al., 1974, se basa en la ecuación diferencial de viga-columna. En su forma continua viene dada por la siguiente ecuación:

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} + E_{py} y - W = 0 \quad (1)$$

Donde

y = deflexión lateral del pilote

$E_p I_p$ = rigidez a la flexión del pilote

P_x = carga axial en la cabeza del pilote

E_{py} = módulo de reacción del suelo basado en curvas p-y

W = carga distribuida a lo largo del pilote

El análisis de rigidez de cada nodo de pilote ($E_p I_p$), se realiza evaluando un balance de fuerzas (tensión y compresión) en n rebanadas de la sección transversal del pilote paralelas al eje de flexión. Esto se logra iterando con valores diferentes de curvatura de flexión (ϕ). Luego, se compra la rigidez del pilote con el valor del momento en el nodo para cada iteración.

La curva p-y para arenas definida por Reese, et al., [13], se muestra en la Fig.7, donde el tramo recto inicial de la curva p-y, se define obteniendo, primeramente, valor de k_{py} , el cual se puede obtener mediante las Tablas III y Tabla IV presentadas a continuación

TABLA III
VALORES REPRESENTATIVOS DE K_{py} PARA ARENA SUMERGIDA

Densidad Relativa	Bajo	Medio	Denso
Valores de K_{py} para arena sumergido	5.4	16.3	34

TABLA IV
VALORES REPRESENTATIVOS DE K_{py} PARA ARENA SOBRE EL NIVEL FREÁTICO (ESTÁTICA Y CÍCLICA)

Densidad Relativa	Bajo	Medio	Denso
Valore de K_{py} recomendado (MN/M ³)	6.8	24.4	61

Para los tramos restantes, la resistencia del suelo, p_k , y la deflexión del pilote, y_k , son calculados a partir de p_m , p_u , y_m y

y_u . Si y_k es mayor que y_u la curva p-y es lineal desde el origen hasta y_u , p_u .

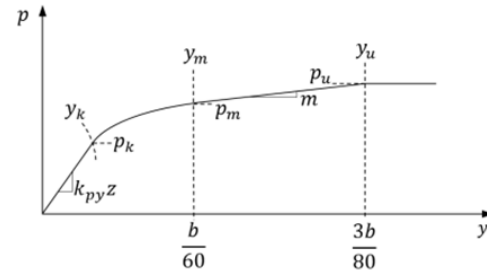


Fig. 7 Curva p-y para arena de Reese, et al., 1974 [13]

Los valores de p_u , p_m se calculan utilizando el menor de los resultados dados por p_s en las ecuaciones a continuación, multiplicados por los coeficientes A y B presentados en la gráfica mediante la Fig. 8.

$$\alpha = \frac{\varphi}{2}, \beta = 45 + \frac{\varphi}{2}, K_0 = 0.4, K_a = \tan^2(45 - \frac{\varphi}{2}) \quad (2)$$

$$p_s = \gamma z \left[\frac{K_0 z \tan \varphi \sin \beta}{\tan(\beta - \varphi) \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \varphi)} (b + z \tan \beta \tan \alpha) \right] + K_0 z \tan \beta (\tan \varphi \sin \beta - \tan \alpha) - K_a b \quad (3)$$

$$p_s = K_a b \gamma z (\tan^8 \beta - 1) + K_0 b \gamma z \tan \varphi \tan^4 \beta \quad (4)$$

$$p_u = \bar{A}_s p_s, p_m = \bar{B}_s p_s \quad (5)$$

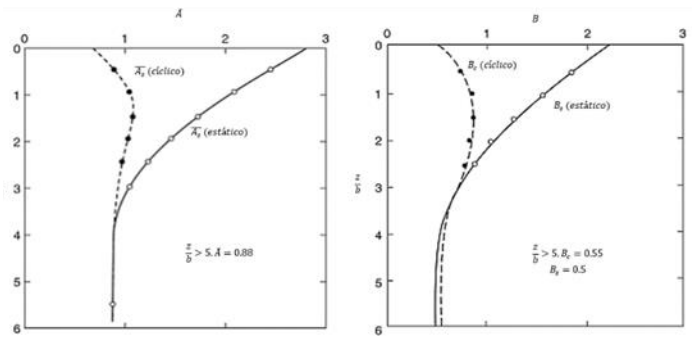


Fig. 8 Coeficiente para la resistencia del suelo versus la profundidad (Reese & Vam Impe, 2011) [14]

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos a partir de RSPile [15] se muestran en gráficos típicos como el presentado en la Fig. 9. El programa permite obtener los desplazamientos, fuerzas cortantes, momentos flectores experimentados por cada pilote.

La Fig. 10 muestra una comparación de los desplazamientos experimentados por los tres pilotes (A, B y C). Se observa claramente que, a menor diámetro, el pilote moviliza menos suelo, con lo cual desarrolla una menor resistencia lateral.

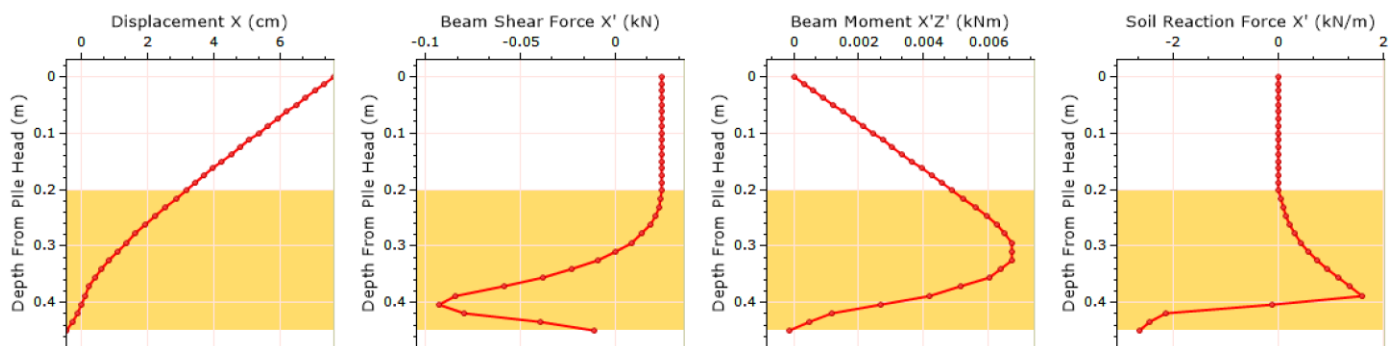


Fig.9 Comparación de los resultados obtenidos en RSPile y en las pruebas realizadas en el Pilote A. Diam = 0.015 m

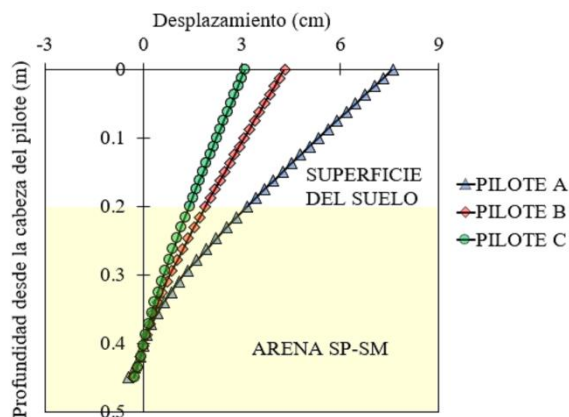


Fig.10 Comparación de los desplazamientos experimentados por los tres pilotes. En amarillo se muestra el nivel del suelo.

Las Figuras 11 a 13 presentan la comparación de los resultados experimentales obtenidos por Almengor et al [1] con los resultados de la modelación numérica realizada en este estudio. En general se puede observar que la data experimental se encuentra en relativa concordancia con las predicciones numéricas. muestra una comparación de los desplazamientos experimentados por los tres pilotes (A, B y C). Se observa claramente que, a menor diámetro, el pilote moviliza menos suelo, con lo cual desarrolla una menor resistencia lateral.

Las pruebas realizadas en el pilote A se muestran en la Fig. 11. Se observa que las dos primeras pruebas (P1 y P2) arrojaron resultados de capacidad los cuales se encuentran por encima de las estimaciones numéricas, mientras que la prueba P3 parece mostrar una mejor aproximación entre los datos experimentales y predicciones numéricas.

En el caso del pilote B, se puede observar que, durante la primera porción del gráfico (0 a 0.02 m) existe muy buena correlación entre los datos experimentales y las aproximaciones de RS Pile. Mientras que, al entrar en el rango de deformación plástica, parecieran existir diferencias en la capacidad máxima alcanzada.

Un comportamiento similar puede observarse en el pilote C (diámetro 0.022 m), en donde las predicciones numéricas se encuentran en buena sintonía con los datos de las pruebas P1 y P3.

De igual manera que en el artículo anterior [1], se observa que los resultados obtenidos experimentalmente a partir del prototipo no logran reproducir los valores esperados al estimar mediante métodos analíticos y numérico existentes en la literatura.

Se considera que esto puede ser debido al carácter artesanal del dispositivo construido. En primer lugar, el material del cajón y del elemento vertical es madera; lo cual inherentemente produce que estos elementos sean propensos a sufrir deformaciones tanto por las cargas aplicadas como también por las condiciones climáticas, las cuales afectan la integridad de la madera.

En segundo lugar, el mecanismo de aplicación de carga utilizado fue de carácter aproximado, por lo cual existe una gran posibilidad de que el error humano haya inducido inconsistencias en los pesos aplicados.

Finalmente, la metodología de medición de desplazamientos (i.e. utilización de una regla o cinta de medir) no constituye un procedimiento confiable para medición de desplazamientos. Lo ideal, sería incorporar la utilización de sensores digitales de desplazamiento con los cuales se pudieran eliminar las fuentes de error externas al aparato

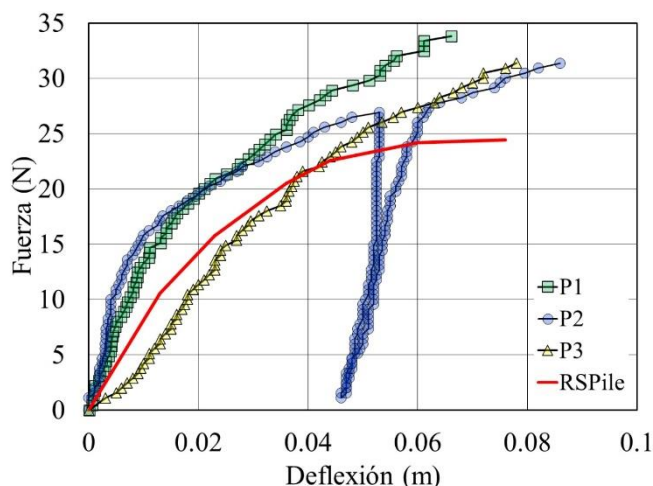


Fig.11 Comparación de los resultados obtenidos en RSPile y en las pruebas realizadas en el Pilote A. Diam = 0.015 m

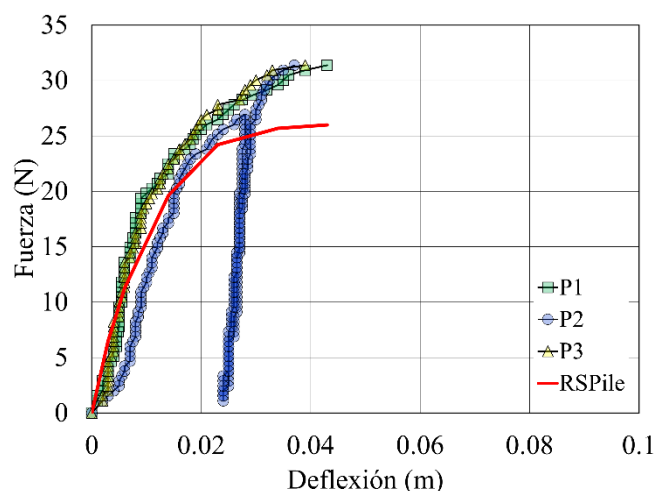


Fig.12 Comparación de los resultados obtenido en RSPile y en las pruebas realizadas en el Pilote B. Diam = 0.019 m

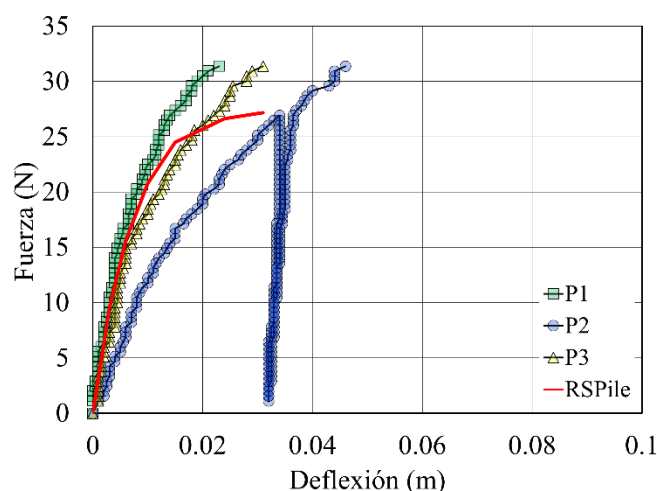


Fig.13 Comparación de los resultados obtenido en RSPile y en las pruebas realizadas en el Pilote C. Diam = 0.022 m

A pesar de las inconsistencias anteriormente mencionadas, se considera que, para los efectos de enseñanza en un salón de clases, el prototipo presentado contiene validación suficiente. Tal como se presentó en Almengor et al [1], es posible realizar aproximaciones de la carga máxima o capacidad del sistema mediante las ecuaciones propias del método de Broms [11], las cuales pueden ser encontradas en libros de texto de mecánica de suelos y/o geotecnia de nivel de pregrado.

Adicionalmente, el dispositivo puede ser utilizado a nivel de estudios de postgrado en materias en las cuales el estudiante necesite aprender a utilizar el método de Reese et al [13], ya que se puede estimar cuanto será el desplazamiento en la parte superior del pilote y correlacionar esto con las ecuaciones y su implementación de acuerdo a lo requerido por el docente.

V. CONCLUSIONES

Tal como fue presentado en [1], el análisis de pilotes bajo cargas laterales es un aspecto importante a considerar dentro del diseño sismo-resistente de una estructura.

El experimento fue enfocado en el análisis físico de pilotes de madera a escala, instalados en suelos arenosos, bajo la hipótesis de que es posible obtener resultados representativos a pequeña escala, los cuales pueden ser utilizados para estimar capacidades de soporte normalizadas, estimar deformaciones esperadas.

Los resultados experimentales obtenidos han sido validados mediante comparación con el método de Broms [11] al igual que con el software RSPile, el cual es de uso comercial a nivel mundial y utiliza el método de Reese et. al. [15]

Pese a que existe variabilidad entre la data experimental y los resultados numéricos, se considera que el modelo (a pesar de ser de carácter artesanal) proporciona un estimado satisfactorio de la capacidad de pilotes a escala, el cual es apropiado para utilizar como herramienta de enseñanza.

La precisión de las mediciones obtenidas es cuestionable, ya que dependían en gran medida del ojo humano lo cual introduce una subjetividad significativa en las lecturas. En esta ocasión no se contaba con medidores de deformación o celdas de carga. Para siguientes versiones del aparato, se tiene pensado utilizar dicho tipo de sensores que permitan realizar lecturas más objetivas y mejorar tanto la resolución como la precisión de los resultados.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo aquí presentado se realizó con el apoyo de la Universidad Tecnológica de Panamá y de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) de la República de Panamá.

REFERENCIAS

- [1] Almengor, L., Miranda, R., Samudio, K. and Grajales, F. "Modelación física de la capacidad de carga lateral de pilotes de madera en suelos granulares", 2022. In review. Revista de Iniciación Científica. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric>
- [2] Grajales-Saavedra, F.J., Pinto, M., Vargas, R., Castillero, M., Cruz, F. "Estudio integrado de la vulnerabilidad y resiliencia a desastres naturales de puertos públicos con muelles de pilotes en el litoral pacífico panameño" (2019). Propuesta sometida a la convocatoria nacional de fomento a I+D (FID). Secretaría nacional de ciencia, tecnología e innovación. República de Panamá.
- [3] Reese, L., & Van Impe, W. *Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading*, 2nd ed., Florida United States of America: CRC Press, 2011. <https://books.google.mv/books?id=buTqBgAAQBAJ&printsec=copyrig#v=onepage&q&f=false>
- [4] H. Matlock, "Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay", in Offshore Technology Conference, 1970, p. Paper OTC1204.
- [5] L. Reese, R. William, and F.D. Koop, "Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay", in Offshore Technology Conference, 1975, p. Paper OTC2312.
- [6] M.F. Bransby, "Selection of p-y curves for design of single laterally loaded piles.", Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., vol. 23, pp. 1909-1926, 1999.

- [7] A. Klar and A. S. Osman, "Load-displacement solutions for piles and shallow foundations based on deformation fields and energy conservation," *Géotechnique*, vol. 58, no. 7, pp. 581-589, 2008.
- [8] Y. Zhang and K. H. Andersen, "Scaling of lateral pile p-y response in clay from laboratory stress-strain curves tory test", *Mar. Struct.*, vol. 53, pp. 124-135, 2017.
- [9] P. Jeanjean, Y. Zhang, A. Zakeri, K. .Andersen, R. Gilbert, and A. Senanayake, "A framework for monotonic p-y curves in clays," in Keynote Paper: International Offshore Site Investigation and Geotechnics Conference, 2017.
- [10]Grajales-Saavedra, F.L., Aubeny C. P., Jeanjean, P. and Drew, D. "Plastic limit analysis of laterally loaded piles and wells conductors in soil profiles with crust," in Offshore Technology Conference, 2017, p. OTC-27785-MS.
- [11]Broms, B., "Lateral resistance of piles in cohesionless soils". *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 90 (3), 123-156, 1964.
- [12]Ruigrok, J. A. T. *Laterally Loaded Piles Models and Measurements*, 2010. [https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:dbcf881e-9cdb-4689-9dbf-018b098d7481/datastream/OBJ Manuscript Templates for Conference Proceedings, IEEE.](https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:dbcf881e-9cdb-4689-9dbf-018b098d7481/datastream/OBJ/Manuscript_Templates_for_Conference_Proceedings_IEEE) http://www.ieee.org/conferences_events/conferences/publishing/templates.html
- [13]Reese, L.C., W.R. Cox & F.D. Koop. "Field testing and analysis of laterally loaded piles in sand". *Proceedings of the VI Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, 2(OTC 2080): 473-485, 1974.
- [14]Reese, L.C. & W.F. Van Impe. "*Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading*", 2nd Edition. London: Taylor & Francis Group, 2011.
- [15]Theory Manual for Laterally Loaded Piles. <https://www.roscience.com/help/rspile/verification-theory/theory-manuals>