

Modelación física de la capacidad de carga lateral de pilotes de madera en suelos granulares

Physical modeling of the lateral load capacity of timber piles in granular soils

Almengor S., Larisa M.; Miranda Q, Roberto C.; Samudio D.c, Krysna W.; Grajales- Saavedra, Francisco J.

Larisa M. Almengor S.

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

Roberto C. Miranda Q

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

Krysna W. Samudio D.c

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

Francisco J. Grajales- Saavedra

francisco.grajales@utp.ac.pa

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

Revista de Iniciación Científica

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

ISSN: 2412-0464

ISSN-e: 2413-6786

Periodicidad: Semestral

vol. 8, 2022

orlando.aguilar@utp.ac.pa

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/338/3383062002/>



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Resumen: . 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 bajo la hipótesis de que es posible replicar el comportamiento de pilotes con pruebas a escala de modo que estos datos puedan ser de utilidad en futuras investigaciones y diseños. Como parte de la investigación, se desarrolló un aparato que permite la aplicación de carga lateral en modelos de pilotes a pequeña escala. Para los experimentos aquí presentados, se utilizó suelo arenoso y pilotes de madera. Los datos fueron validados mediante la utilización de métodos analíticos que permiten estimar la capacidad última de pilotes bajo cargas laterales. Los resultados muestran una buena correlación entre los resultados experimentales y las predicciones analíticas.

Palabras clave: Arena, capacidad, carga lateral, madera, modelación, pilotes.

Abstract: . The analysis of piles subjected to lateral loads is a very important aspect in the design of both conventional structures and maritime infrastructure. This article presents results of an experimental investigation carried out under the hypothesis that it is possible to replicate the behavior of piles with scale tests so that these data can be useful in future investigations and designs. As part of the research, an apparatus was developed that allows the application of lateral loading on small-scale pile models. For the experiments presented here, sandy soil and wooden piles were used. The data were validated by using analytical methods that allow estimating the ultimate capacity of piles under lateral loads. The results show a good correlation between the experimental results and the analytical predictions.

Keywords: Sand, capacity, lateral load, timber, modeling, piles.

1. INTRODUCCIÓN

Los pilotes consisten en elementos constructivos similares a columnas colocadas verticalmente o de forma inclinada. Son utilizados para cimentación de estructuras, con el fin de transmitir las cargas hasta un estrato resistente del suelo, en casos en que este se encuentre a una profundidad tal que hace no-viable, la utilización de una cimentación más económica como zapatas o losas [1].

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), por consiguiente, se hace necesario cuantificar los efectos de estas cargas sobre los mismos [2].

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 (figura 1).

1.1 Justificación

La industria marítima representa uno de los pilares más importantes en la economía de la República de Panamá, y se considera que tiene un potencial de crecimiento considerable. La mayor parte de los puertos privados poseen planes de

mantenimiento establecidos. 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. Los pilotes son sistemas de cimentaciones que consisten en columnas de concreto, acero o madera, las cuales son empotradas a una profundidad determinada en el suelo marino. 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 traer como consecuencia la falla de los pilotes.

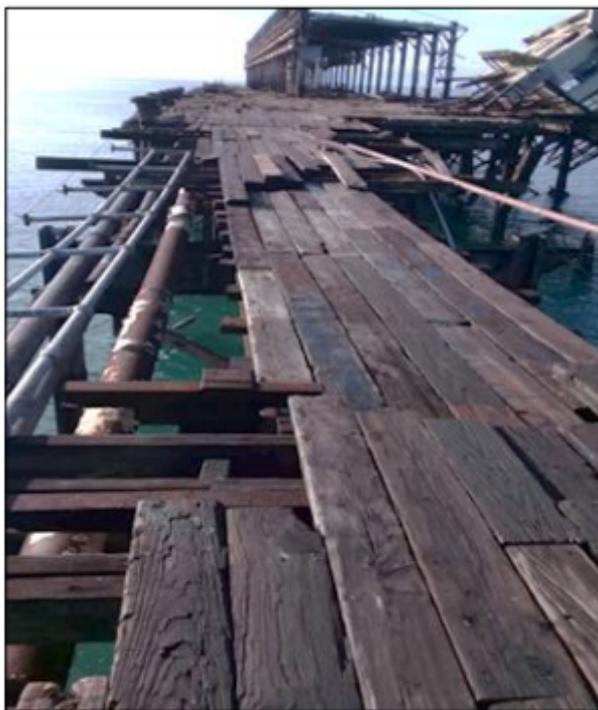


FIGURA 1.
Daños causados por actividad sísmica al Muelle Fiscal de Puerto Armuelles, Provincia de Chiriquí, República de Panamá.
Autoridad Marítima de Panamá (2019) [3].

La figura 2 (a-d) muestra un resumen gráfico de las condiciones de algunos muelles en Puerto Vacamonte. 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 [1].

Pese a ser un puerto de importancia, se pueden nombrar una serie de daños estructurales observables en los muelles. 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.

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 [1].

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.



FIGURA 2.

Diversos daños a pilotes en Puerto Vacamonte. (a) y (b) daños en pilotes de madera debido a cargas de impacto. (c) y (d) invasión de agentes biológicos en pilotes de concreto.

Ing. Ruby Vallarino, Ing. George Mejía.

Un cierre (temporal o permanente) de un muelle debido a fallas en los pilotes traería como consecuencia repercusiones socioeconómicas significativas, ya que afectaría indudablemente la funcionalidad de la terminal portuaria y las

cadenas de suministro que dependen del mismo. En el caso de puertos estatales, la actividad económica más afectada sería la industria pesquera.

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 [1].

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.

1.2 Objetivo

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.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada para esta investigación se presenta de manera gráfica en la figura 3. Se observa que contiene tanto componentes de modelación física, experimentos de laboratorio como métodos analíticos.

Para el desarrollo de esta investigación se concibió un aparato sencillo (figura 4) para la aplicación de carga lateral en pilotes. La idea fue primeramente plasmada en un programa de modelado, el cual permite realizar modelaciones en tres dimensiones.

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.

El artefacto diseñado (figura 5) 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.

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 1.



FIGURA 3.
Metodología utilizada en la elaboración de la investigación.

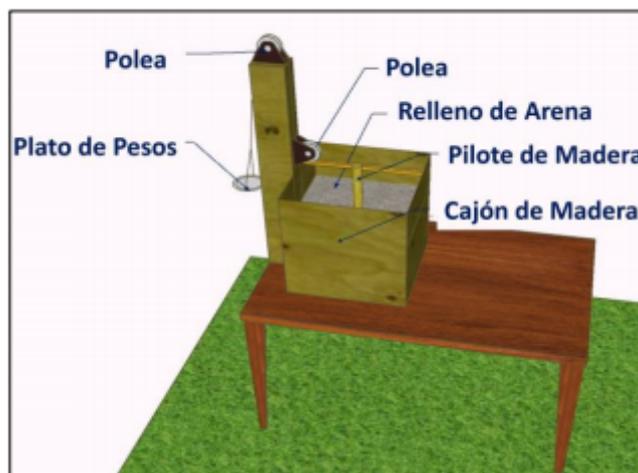


FIGURA 4.
Modelado del diseño del aparato para pilotes de carga lateral.

TABLA 1
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	0.015x 0.45m
7	Pilote B: tarugo de madera	0.019x 0.45m
8	Pilote C: tarugo de madera	0.02 x 0.45m

El suelo utilizado fue un material arenoso. Para efectos de homogeneizar, se realizó un cribado manual con una malla de 1 mm de apertura. Posteriormente se procedió a realizar la clasificación de la arena de acuerdo con las normas ASTM D422, ASTM D4318 y ASTM D2487 [11][12][13]. Es

importante recalcar que por efecto de las condiciones climáticas la arena pudo haber cambiado sus propiedades, por lo cual se produjeron pequeñas variaciones en las pruebas.

Para la prueba, el primer paso fue construir el aparato con el juego de poleas, se realizaron calibraciones iniciales de cargas y del modelo para que estuviera nivelado completamente y reducir el margen de error, se inició colocando las diferentes variaciones de carga en el plato de pesas, con la ayuda de una cinta métrica colocada paralelamente al pilote se observó el desplazamiento una vez colocadas las cargas en el plato de pesas.

En la primera prueba se utilizó un pilote a escala de 0.015x0.45 m y cargas de 0.25 lb, hasta llegar a un total de 7 lb y se observó un desplazamiento final de 2.95 plg. Por lo

tanto, se decidió repetir la prueba con dos pilotes de diferentes diámetros, a cada uno se le realizaron 3 pruebas con incremento de carga de 0.1 lb para poder obtener más datos. Se esquematizaron las mediciones de los pilotes y se observó el desplazamiento causado por los incrementos de cargas.



FIGURA 5.
Producto final del aparato para pilotes de carga lateral.

2.1 Métodos para el análisis de pilotes bajo cargas laterales

Existen numerosos métodos que permiten realiza análisis tanto de capacidad como de desempeño de pilotes sometidos a cargas laterales. Entre los más comunes en la literatura se pueden mencionar los métodos basados en soluciones elásticas, métodos basados en curvas equivalente p-y (lineales como también no-lineales) y finalmente los métodos de análisis de estado límite, los cuales por lo general permiten estimar una magnitud de carga última, bajo ciertos mecanismos de falla previamente supuestos.

Para efectos de esta investigación, se realizará una comprobación puntual utilizando un método de análisis de estado límite. Sin embargo, vale la pena mencionar que lo más conveniente para efectos de una comprobación completa sería realizar un análisis utilizando resortes equivalentes p-y.

2.1.1 Método de Broms

En este artículo se presentan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en el aparato de carga lateral en pilotes y el análisis de los datos obtenidos en torno a los objetivos planteados anteriormente.

Para utilizar la gráfica (figura 6) primero se debe calcular el valor de L/D y e/L.

Donde

L = longitud enterrada del pilote,

e = longitud del pilote que sobresale D = diámetro del pilote

Una vez determinados los valores, se procede a ubicarlos en el gráfico y así se obtiene el valor de la resistencia lateral ultima (##). El valor de resistencia lateral última es igual a:

$$N_H = \frac{Q_u(q)}{K_p \gamma D^3} \quad (1)$$

Se debe despejar para que este en función de ϕ' siendo esta la carga última. La variable K_p es el coeficiente de presión pasiva de tierra de Rankine y está representada por la siguiente ecuación:

$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) \quad (2)$$

En cuanto a los valores ϕ' y ϕ , estos se suministran según el tipo de suelo en el que se trabaja. En el caso de estudio de esta investigación los valores fueron asumidos en base al tipo de suelo empleado.

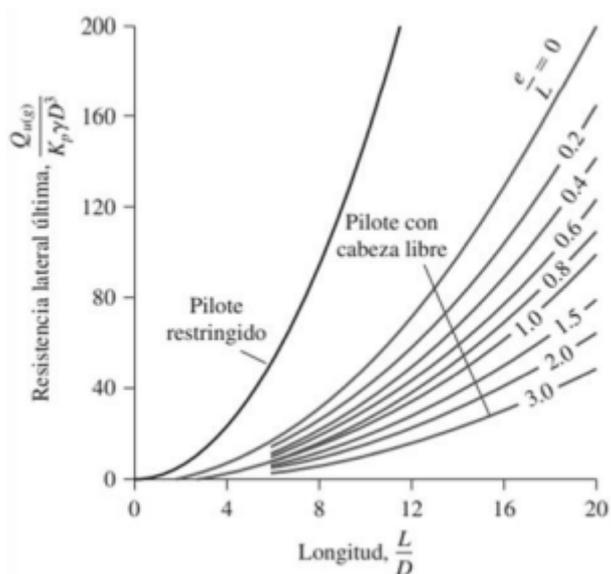


FIGURA 6.

Solución gráfica presentada por Broms para el caso de pilotes cortos bajo cargas laterales.

Das, B. M. Fundamentos de ingeniería de cimentación (7th ed.), (2012) [14].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos de clasificación de suelos indican que la arena utilizada corresponde a un suelo tipo SP-SM, arena mal graduada con limo. Esta clasificación no es ideal, puesto que los materiales limosos tienden a ser particularmente sensibles ante la presencia de agua. Los resultados de los tres ensayos de clasificación se muestran en la figura 7.

En las pruebas que se realizaron con diferentes pilotes se obtuvo que dependiendo del diámetro del pilote la deformación cambiaba, entre mayor es el diámetro menor es la deformación.

En las pruebas de campo, se registraron 9 mediciones 3 para cada pilote, en la cual 2 de ellas fueron de carga y 1 carga y descarga. La cual consistía en cargar el sistema hasta cierto peso para luego descárgalo y volverlo a cargar con el fin de evaluar la pendiente del rango elástico en el sistema. Los resultados de las pruebas realizadas para cada pilote se presentan en las figuras 8 a 10.

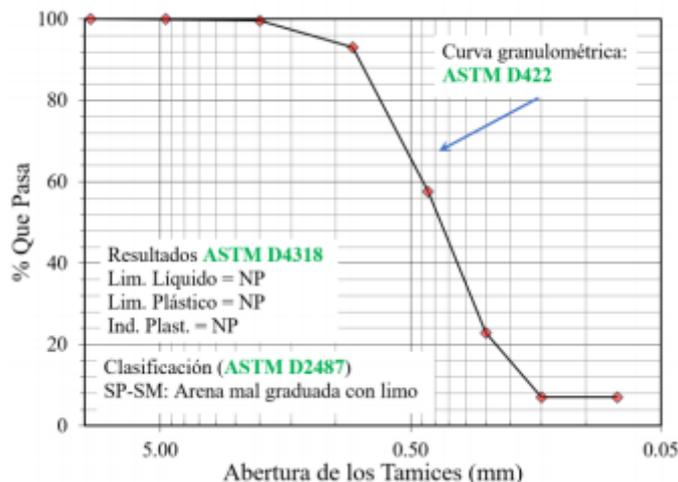


FIGURA 7. Resultado del análisis granulométrico.

A partir del peso acumulado en el sistema se obtuvieron las deformaciones para cada uno de los pilotes. En base a los resultados registrados se obtuvieron los gráficos mostrados en la figura 8.

Las deformaciones están dadas en metros y la fuerza en Newton. La línea verde representa la primera prueba de carga, la línea azul representa la prueba de carga y descarga para evaluar el rango elástico del sistema y la roja representa la segunda prueba de carga.

En las pruebas que se realizaron a los pilotes A, B y C, se observó que luego de cierto incremento de carga la deformación no se veía afectada, por lo tanto, se determinaron que en algunos intervalos de carga se repetía la deformación. Cuando se agregaba una carga no había deformación o cuando ya se llegaba a la carga toda la deformación era mínima.

La capacidad se ha estimado como la carga correspondiente al límite de proporcionalidad de la pendiente inicial de la prueba. Estos límites se han marcado con una letra X en la figura 8 a 10.

Para efectos de la verificación de resultados, se procedió a utilizar el método de Broms, mencionado anteriormente, para calcular la capacidad del pilote. Es importante mencionar 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 han mencionado que los resultados del Método de Broms 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 [15]. Los resultados obtenidos por el método analítico se presentan en la tabla 2 a continuación.

TABLA 2. Cálculo de capacidad por método de Broms

Parámetros	Pilote A	Pilote B	Pilote C
L/D	13.33	10.53	9.09
Q _{BROMS}	8.41 N	8.54 N	9.68 N
Q _u = 2	16.84	17.08	19.36
Q _{BROMS}	N	N	N

Una comparación sencilla de los resultados obtenidos analíticamente permite constatar preliminarmente que los resultados experimentales son válidos, siempre y cuando la capacidad sea definida por el límite de proporcionalidad. La tabla 3 a continuación muestra una comparación del promedio obtenido experimentalmente para cada pilote, con la carga estimada analíticamente.

Los resultados de la tabla son indicativos de que durante el experimento correspondiente al Pilote C hubo algún cambio no previsto en las condiciones del suelo. Esto se corrobora con la discrepancia que existe entre las tres curvas de dicho experimento, las cuales fueron presentadas en la figura 10.

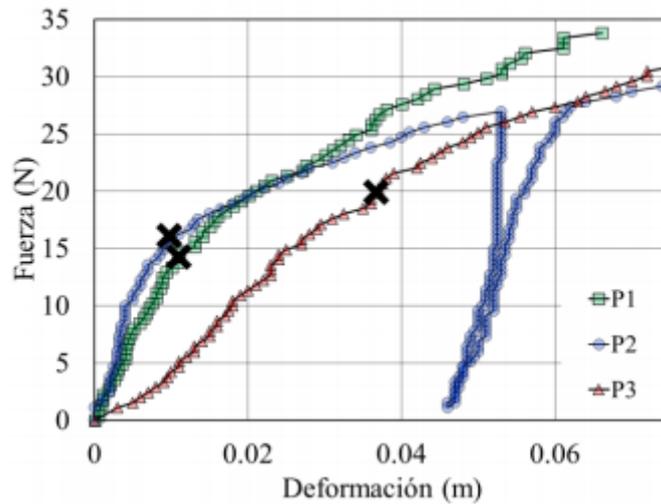


FIGURA 8

Resultados de pruebas realizadas en el Pilote A. Diam = 0.015m

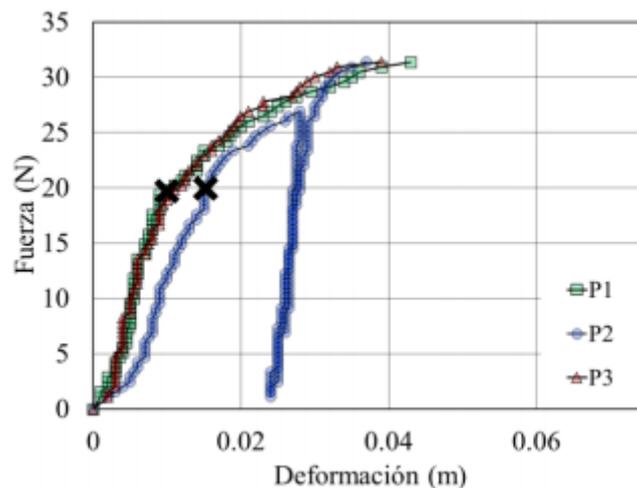


FIGURA 9.

Resultados de pruebas realizadas en el Pilote B, Diam = 0.019m.

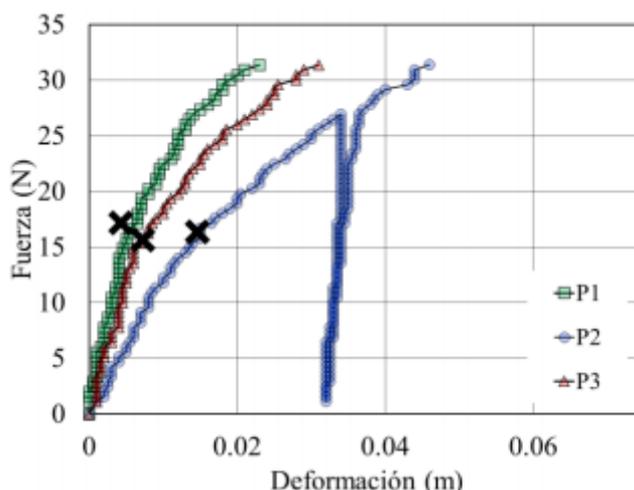


FIGURA 10. Resultados de pruebas realizadas en el Pilote C, Diam = 0.022m.

TABLA 3. 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 (Brons)	16.84 N	17.08 N	19.36 N

4. CONCLUSIONES

El análisis de pilotes bajo cargas laterales es un aspecto importante a considerar dentro del diseño sismo-resistente de una estructura. La inspiración para realizar esta investigación fue precisamente el daño observado en el Muelle Fiscal de Puerto Armuelles debido al sismo ocurrido en el año 2019.

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 y, principalmente, para calibrar modelos numéricos que puedan ser entonces utilizados para la realización de análisis paramétricos.

Esta investigación permitió también implementar métodos de experimentación en el área educativa con respecto a pruebas de pilotes sometidos a cargas laterales. Lo cual, sin duda, será catalizador creativo y brindará un punto de partida en futuros aparatos orientados a modelar de mejor forma el fenómeno en estudio.

El artefacto propuesto está conformado por materiales de fácil acceso y fue elaborado utilizando herramientas básicas. Durante el desarrollo de este aparato, mediante la observación y análisis de los datos obtenidos es posible concluir lo siguiente:

- En el caso de suelos granulares, el comportamiento del pilote dependerá en gran medida de las condiciones ambientales y de las propiedades índice (i.e. granulometría y límites de consistencia) del suelo. Se pudo observar que el comportamiento

del sistema con arena seca (Pilotes A y B) tiende a ser más consistente que cuando se utiliza arena ligeramente humedecida (Pilote C).

- Se constata que, a mayor diámetro, se disminuye la deformación experimentada por el pilote bajo similares condiciones de cargas.

- Resulta complicado definir con claridad la capacidad de un pilote en suelo granular. Esto se ha 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.

- El comportamiento de pilotes instalados en suelo arenoso parece depender fuertemente de la tasa de aplicación de carga (o de deformación). En el caso de estudio, los pilotes fueron sometidos a deformaciones extremas en comparación con las experimentadas en la realidad.

- 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. 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 mejorar la precisión.

Finalmente, es importante mencionar que el experimento aquí presentado constituye la etapa inicial de un trabajo en proceso, el cual se constituirá en una tesis de grado. Por esta razón existen numerosas mejoras que se piensan realizar en el sistema con tal de optimizar el funcionamiento del mismo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los familiares por el apoyo y dedicación ofrecidos en las diversas etapas del desarrollo de esta investigación. Se agradece también los aportes brindados por el Dr. Ramiro Vargas. Se agradece también al personal del Laboratorio de Suelos del Centro Regional de Chiriquí, por el apoyo en la caracterización de los suelos.

REFERENCIAS

- [1] Grajales-Saavedra, F.J., Pinto, M., Vargas, R., Castellero, M., Cruz, F. (2019). Estudio integrado de la vulnerabilidad y resiliencia a desastres naturales de puertos públicos con muelles de pilotes en el litoral pacífico panameño. Propuesta sometida a la convocatoria nacional de fomento a I+D (FID) 2019. Secretaría nacional de ciencia, tecnología e innovación. República de Panamá.
- [2] Reese, L., & Van Impe, W. (2011). *Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading* (2nd ed.). Florida United States of America: CRC Press. Retrieved from, <https://books.google.mv/books?id=buTqBgAAQBAJ&cp rintsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- [3] Autoridad Marítima de Panamá (2019). Comunicado de muelle fiscal de Puerto Armuelles. Retrieved from <https://amp.gob.pa/notas-de-prensa/comunicado-sobre-muelle-fiscal-de-puerto-armuelles/>
- [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] F. L. Grajales-Saavedra, C. P. Aubeny, P. Jeanjean, and D. Drew, "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] American Society for Testing and Materials (ASTM), 2007. Método de prueba estándar para análisis por tamizado de suelos, ASTM D422.
- [12] American Society for Testing and Materials (ASTM), 2018. Métodos de prueba estándar para el lpímite de líquido, el límite de plástico y el índice de plasticidad de los suelos, ASTM D4318.
- [13] American Society for Testing and Materials (ASTM), 2017. Standard practice for classification of soils for engineering purposes, ASTM D2487.
- [14] Das, B. M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. (S. Cervantes & O. Ramírez, Eds.) (7th ed.). Cengage Learning. Retrieved from [https://es.scribd.com/document/278994977/Fundamento s-de-Ingenieria-de-Cimentaciones-Braja-M-Da](https://es.scribd.com/document/278994977/Fundamento-s-de-Ingenieria-de-Cimentaciones-Braja-M-Da)
- [15] J. A. T. Ruigrok (2010). *Laterally Loaded Piles Models and Measurements*. Retrieved from <https://repository.tu-delft.nl/islandora/object/uuid:dbcf881e-9cdb-4689-9dbf-018b098d7481/datastream/OBJ>