

Comparación de métodos semi-empíricos y experimentales de ensayos de compresión, sobre pilotes de hormigón armado

Mariana Kallus Lobsiger^a; Mario García González^b; Gustavo Chávez Chaparro^c

^a Universidad Nacional de Itapúa, Encarnación, Paraguay, kallusmariana@gmail.com

^b Universidad Nacional de Itapúa, Encarnación, Paraguay, alfre.garcia7@gmail.com

^c Universidad Nacional de Itapúa, Encarnación, Paraguay, gustavo.chavez@fiuni.edu.py

Resumen

En Paraguay los proyectos de cimentaciones profundas presentan un carácter empírico basados en métodos de previsiones de carga. Considerando esto, se realizaron pruebas de carga a compresión en el predio de la Universidad Nacional de Itapúa, a fin de verificar el comportamiento real de un pilote sometido a una carga estática a compresión, y compararlo con las capacidades obtenidas por los métodos de: Aoki & Velloso (1975) y Decourt & Quaresma (1978). El ensayo fue llevado a cabo considerando la Norma Brasileira NBR 6122-96, con cargamento rápido. Fueron sometidos bajo carga 6 pilotes de Hormigón Armado de 40 centímetros de diámetro, con profundidades de 5 y 7 metros. Las previsiones de la capacidad de carga de cada pilote, se basan en correlaciones del ensayo dinámico SPT. Con el ensayo de campo se registraron: “valores de cargas y asentamientos” de cada pilote, y con ellos, se obtuvieron las cargas máximas que pueden soportar los pilotes a través de métodos experimentales, para luego compararlos con los valores de diseño de los métodos semi-empíricos. Esta comparación de resultados indicó que Aoki & Velloso arroja cargas admisibles por debajo de las obtenidas por métodos experimentales; sin embargo, Decourt & Quaresma, arrojó valores más próximos a los obtenidos experimentalmente.

Palabras clave: capacidad de carga, SPT, método semi-empírico, método experimental.

Abstract

In Paraguay, deep foundation projects have an empirical nature based on load forecasting methods. Considering this, compression load tests were carried out on the premises of the National University of Itapúa, in order to know the real behavior of a pilot subjected to a static compression load, and compare it with the capacities obtained by the methods of: Aoki & Velloso (1975) and Decourt & Quaresma (1978). The test was carried out considering the Brazilian Standard NBR 6122-96, with rapid loading. 6 Reinforced Concrete pilots of 40 centimeters in diameter, with depths of 5 and 7 meters, were subjected under load. The load capacity predictions for each pilot were based on correlations from the SPT dynamic test. With the field test, “load and settlement values” of each pilot were recorded, and with them, the maximum loads that the pilots can withstand were obtained

through experimental methods, to later compare them with the design values of the semi-empirical methods. This comparison of results indicated that Aoki & Velloso shows admissible loads below those obtained by experimental methods; however, Decourt & Quaresma, showed values closer to those obtained experimentally.

Keywords: load capacity, SPT, semiempirical method, experimental method.

1. Introducción

En la literatura técnica encontramos estudios de campo sobre la estimación de la capacidad de carga última de los pilotes; diferentes autores proponen métodos para determinar la carga última, dependiendo de variables geotécnicas y geométricas, en cambio, en la práctica se han llevado a cabo pruebas de carga estática a compresión sobre pilotes, debido a que es el método más seguro y confiable para determinar el comportamiento de un pilote o un conjunto de ellos.

En Paraguay no es habitual la realización de pruebas de carga en pilotes para la verificación de los valores de diseño, por lo que se torna una necesidad el estudio y comparación de los valores obtenidos experimentalmente. Por ello, el principal objetivo de la investigación fue comparar los resultados de la carga de rotura obtenida en el ensayo de prueba de carga con los valores de diseño, obtenidos por los métodos de Aoki & Velloso (1975) y Decourt & Quaresma (1978).

2. Objetivo General

Comparar los resultados de la carga de rotura a compresión sobre pilotes obtenida por ensayo de prueba de carga con los valores de diseño de Aoki & Velloso, y Decourt & Quaresma.

3. Materiales y Métodos

Los materiales y dispositivos utilizados fueron los siguientes:

- Un cilindro hidráulico de la marca EMIC, accionado por una bomba manual.
- Un manómetro convencional de la marca ASTA, conectado a la bomba y al cilindro.
- Una viga metálica IPN50, de 50 cm x 18,5 cm.
- Dos placas de acero galvanizado de ½" con 4 agujeros en sus extremos para sujetar a la viga metálica.
- Un equipo de soldadura de la marca Gladiator Electrónica con capacidad de 200A/80V.
- Dos deflectómetros con una precisión de 10^{-3} mm.

En cuanto a la metodología se tuvieron los siguientes procesos:

3.1 Ensayo SPT

Se tuvo en cuenta datos del ensayo SPT (Standard Penetration Test) realizados ya con anterioridad en la zona de estudio; dicho ensayo se realizó siguiendo las directrices de la Norma Brasileira ABNT NBR 6484 [1]. La Fig. 1 representa un esquema de los resultados obtenidos del SPT.

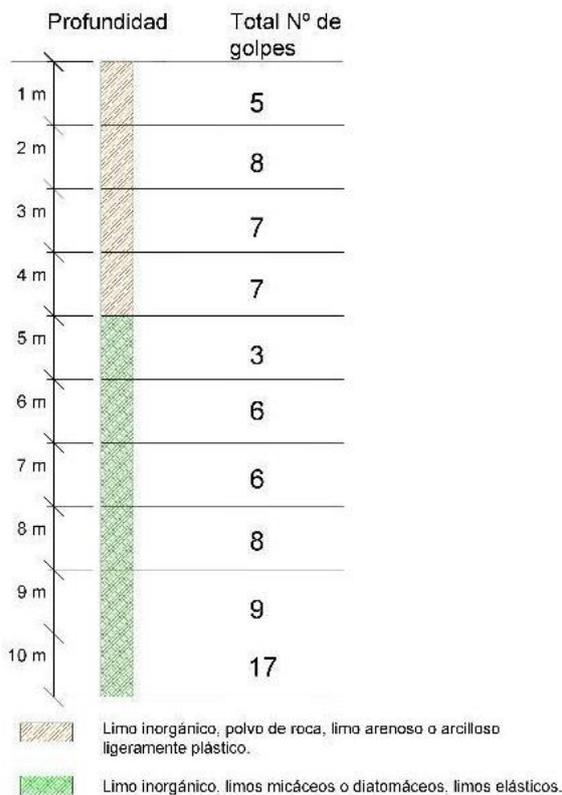


Fig. 1. Esquema de ensayo SPT vs profundidad.

3.2 Cálculo de la carga de rotura por métodos semi-empíricos.

Entre los métodos semi-empíricos utilizados para determinar la carga de rotura fueron consultados: el método de Aoki & Velloso (1975) y el de Decourt & Quaresma (1978). Según Aoki & Velloso [2] la capacidad de carga es obtenida por la siguiente ecuación:

$$Q_{rot} = A_p \frac{K \cdot N_p}{F_1} + P \sum \frac{\alpha \cdot K \cdot N_m}{F_2} \Delta L$$

Donde:

Q_{rot} : Capacidad de carga en toneladas.

A_p : área de punta del pilote.

N_p : valor del N_{SPT} en la punta del pilote.

P : perímetro del pilote.

N_m : valor medio del N_{SPT} para cada ΔL .

ΔL : espesor de cada camada de suelo.

Decourt & Quaresma [3] establece la siguiente ecuación para determinar la capacidad de carga:

$$Q_{rot} = \alpha \cdot K \cdot N_p \cdot A_p + P \cdot \beta \cdot \sum 10 \left(\frac{N_m}{3} + 1 \right) \Delta L$$

Donde:

Q_{rot} = Capacidad de carga en toneladas.

N_p : valor del N_{SPT} en la punta del pilote.

A_p : área de la punta del pilote.

P : perímetro del pilote.

N_m : valor medio del N_{SPT} para cada ΔL .

ΔL : espesor de cada camada de suelo.

Para la aplicación de ambos métodos se consideraron los datos del ensayo SPT, antes mencionado.

3.3 Prueba de carga de pilotes

El grupo de pilotes estaba compuesto por un par de pilotes de reacción ubicados uno a cada lado del pilote central a ensayar, por lo tanto, se contó con ocho pilotes de reacción y seis pilotes a ensayar. Dos de los pilotes a ensayar estaban cimentados a 5,00 m de profundidad con 40,00 cm de diámetro (P1 y P2) y los cuatro restantes se encontraban a 7,00 m de profundidad con diámetros de 40,00 cm cada uno (P3 a P6), los pilotes de reacción tenían 7,00 m de profundidad. Los pilotes fueron excavados con pilotera tipo Strauss, y para los mismos no fue necesario el uso de lodo de contención o camisa de revestimiento, pues las paredes presentaron buena estabilidad. Todos los pilotes fueron armados con 6 barras de 12,00 mm de diámetro en toda su longitud y estribos de 6,00 mm espaciados cada 20,00 cm. La elaboración del hormigón para los pilotes se realizó in situ por medio de una hormigonera de 500 l. En la parte superior de los pilotes de

reacción se construyeron pilares de hormigón armado con dimensiones de 0,30 x 0,30 m, nivelados, los cuales sirvieron de apoyo para la viga de reacción. Los pilares fueron armados con la prolongación de las 6 barras de 12,00 mm de los pilares de 7,00 m. Sobre los pilotes centrales a ensayar fueron construidos unos cabezales de Hormigón Armado de dimensiones 0,60 x 0,60 x 0,40 m, con armadura tipo jaula de 10,00 y 8,00 mm de diámetro y espaciamiento de 10,00 cm, en dichos cabezales fue apoyado el dispositivo de aplicación de carga sobre cada pilote.

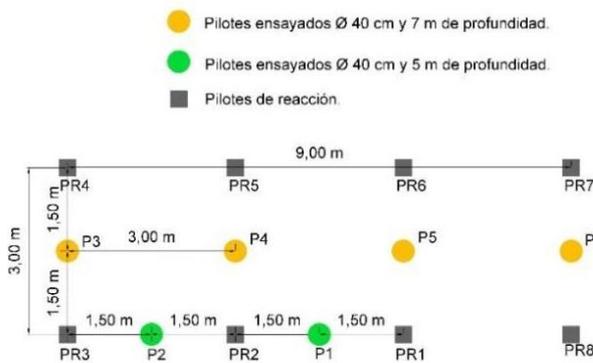


Fig. 2. Disposición de pilotes vista en planta.

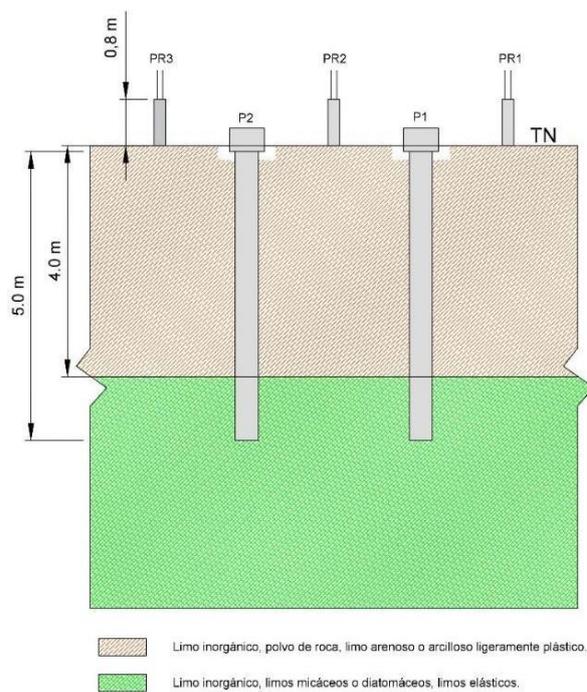


Fig. 3. Disposición de pilotes vista en corte. La Fig. 2 presenta la disposición en planta de los pilotes ensayados y de reacción, y en la Fig. 3 se puede observar el perfil de los pilotes de 5,00 m.

Las pruebas de carga estática fueron realizadas en conformidad con la Norma Brasileña ABNT NBR 12131 [4], ejecutadas con cargamento rápido. La misma norma provee elementos para evaluar el comportamiento carga-asentamiento y para estimar las características de capacidad de carga. En la prueba de carga, los pilotes se cargaron hasta la eficiencia máxima del conjunto bomba-manómetro-cilindro, o bien, hasta la capacidad de soporte de los pilotes de reacción, teniendo en cuenta que se ensayó tanto los pilotes centrales como los pilotes de reacción a su última capacidad de carga.

Previamente al ensayo, se realizó una limpieza alrededor del cabezal del pilote, con el fin de evitar contacto con el suelo. Para reducir los efectos de dilatación térmica, se montó una estructura con lona plástica protegiendo el equipamiento del sol y eventual lluvia.

En las fases iniciales de cada cargamento las variaciones de los asentamientos generalmente se produjeron lentamente y en pequeñas proporciones, estos asentamientos aumentaron rápidamente en las fases finales donde las cargas aplicadas son mayores. Se verificó que en cada una de las fases de cargamento ocurrió una estabilización rápida de los asentamientos, siendo suficiente el intervalo de 5 min, entre la aplicación de incrementos sucesivos.

Luego de la aplicación de la carga, transcurrido los 5 min contados a partir del

inicio de la fase, fueron tomadas las lecturas de los 2 deflectómetros independientemente a la estabilización de los asentamientos.

El intervalo de carga que fue aplicado a cada fase fue de 2,97 Tn, teniendo en cuenta que nuestra carga máxima de trabajo según valores de diseño fue de 30,69 Tn para pilotes de 5,00 m y de 37,26 Tn para pilotes de 7,00 m de profundidad, según el método de Decourt & Quaresma no superando así el 10% de dichas cargas. Considerando los valores de capacidad de carga obtenidos por el método de Aoki & Velloso que fueron de 16,90 Tn y 19,83 Tn para los pilotes de 5,00 m y 7,00 m de profundidad respectivamente, igualmente fue aplicado un intervalo de 2,97 Tn a cada fase, por una mayor practicidad.

La Fig.4 es un esquema de la prueba de carga a compresión sobre pilotes.

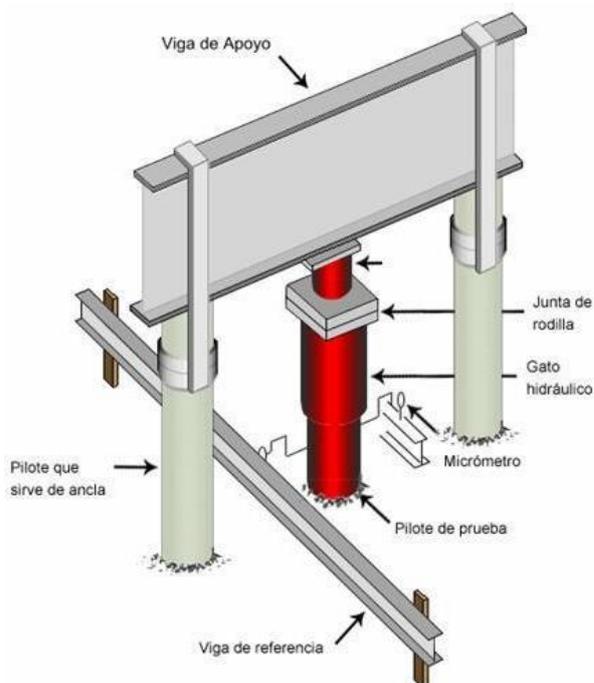


Fig. 4. Esquema de prueba de carga a compresión.

Los datos se registraron y transcribieron en planillas debidamente elaboradas para el ensayo, a continuación, se procedió a la

realización de las respectivas curvas carga-asentamiento correspondiente a cada ensayo y posteriormente se analizaron los resultados para obtener las conclusiones.

3.4 Elaboración de las curvas carga-asentamiento y determinación de cargas de rotura

Con los valores de carga y asentamiento medidos en cada fase de la prueba de carga de cada uno de los pilotes, se procedió a la elaboración de las curvas de carga de los pilotes ensayados, los valores de los asentamientos se colocaron en el eje de ordenadas y las cargas en el de abscisas.

La unidad de medida adoptada para el asentamiento fue el milímetro y se colocó en intervalos de 0,50 mm, 1,00 mm ó 2,00 mm de acuerdo a los asentamientos presentados por cada pilote; la carga se expresó en toneladas y se colocó en intervalos de 2,0 Tn. Para determinar las cargas de rotura se utilizaron los métodos de la Norma Brasileira ABNT NBR 6122-96 [5] y el Método de Intersección de Tangentes - Manzur y Kaufman 1956 [6] y el Método de Inclinación de Tangentes - Kulhawy et al [7]. De la Norma Brasileira utilizamos la siguiente ecuación:

$$r_U = \frac{P_U \cdot L}{A \cdot E} + \frac{D}{30}$$

Donde:

r_U : Asentamiento de rotura en cm.

P_U : Carga de rotura convencional en kg.

L : Longitud del pilote en cm.

A : Área de sección transversal del pilote.

E : Módulo de elasticidad del pilote.

D : Diámetro círculo circunscrito al pilote.

El valor del asentamiento del pilote, obtenido de la ecuación, debe ingresarse en la curva

carga-asentamiento, trazando una línea recta paralela al eje de abscisas hasta interceptar la curva y desde allí una línea paralela al eje de ordenadas hasta el eje de abscisas donde se determina la carga de rotura correspondiente a cada pilote.

La carga de rotura obtenida por el método de **intersección de tangentes**, consiste en trazar una recta tangente al primer segmento lineal de la curva carga-asentamiento y otra recta tangente al segundo segmento lineal de dicha curva, en la intersección de estas dos rectas tangentes debe trazarse una línea paralela al eje de ordenadas y donde dicha línea intercepta al eje de abscisas se toma como la carga de rotura del pilote.

El último método de **inclinación de tangentes** consiste en trazar una recta tangente al primer segmento lineal de la curva y luego una paralela a esta recta a 4,00 mm del eje de ordenadas y en la intersección de esta recta con la curva carga-asentamiento debe trazarse una línea paralela al eje de ordenadas y el valor donde intercepta al eje de abscisas se toma como la carga de rotura. En la Fig. 5 se muestra los tres métodos experimentales que se utilizaron.

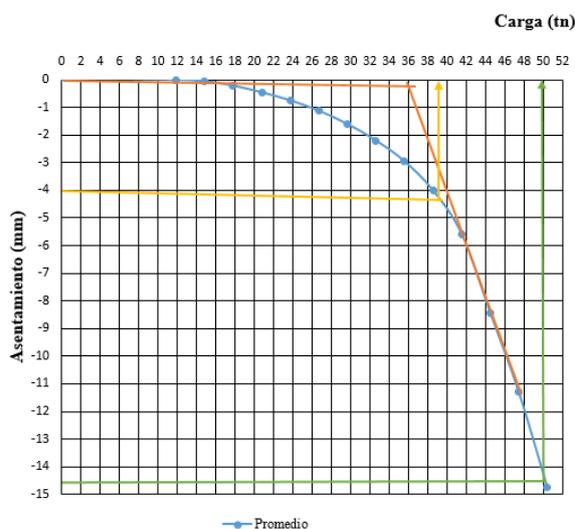


Fig. 5. Métodos experimentales utilizados en la curva carga-asentamiento.

4. Resultados

La siguiente tabla muestra un resumen de los valores de la Capacidad de Carga de los pilotes, que se obtuvieron al utilizar los métodos semi-empíricos y los métodos experimentales.

Tabla 1. Resumen de valores obtenidos por métodos semi-empíricos y experimentales

Pilote N°	Métodos Semi-Empíricos		Métodos Experimentales		
	M1	M2	M3	M4	M5
1	16,9	30,7	-	15,0	-
2	16,9	30,7	25,5	20,0	17,8
3	19,8	37,3	52,9	28,0	33,4
4	19,8	37,3	50,0	36,0	39,8
6	19,8	37,3	23,2	15,4	16,3

Donde:

M1: Aoki & Velloso (Tn)

M2: Decourt & Quaresma (Tn)

M3: NBR (Tn)

M4: Intersección de tangentes (Tn)

M5: Inclinación de tangentes (Tn)

Sobre los pilotes de 5,00 m de profundidad se alcanzó una carga máxima, registrado en el Pilote N°2, de 44,5 Tn con valores de asentamientos de -41,61 mm y -41,47 mm para los deflectómetros 1 y 2 respectivamente, obteniendo un valor promedio de -41,54 mm. Para los pilotes de 7,00 m de profundidad se registró una carga máxima en el Pilote N° 3 de 53,4 Tn, con asentamientos de -14,02 mm y -14,17 mm para los deflectómetros 1 y 2 respectivamente, con un valor promedio de asentamiento de -14,10 mm. Con estos datos y aplicando los métodos experimentales considerados obtuvimos: según la Norma

Brasileira NBR 6122-96 [5] una carga última máxima en los pilotes de 5,00 m de profundidad de 25,50 Tn; según la Intersección de Tangentes fue de 20,0 Tn y según la Inclinación de Tangentes fue de 17,8 Tn, para el pilote N° 2. Para los pilotes de 7,00 m de profundidad la carga última máxima según la NBR 6122-96 fue de 52,9 Tn en el pilote N° 3, el método de Intersección de Tangentes arrojó un valor máximo de 36,0 Tn en el pilote N° 4 y el de Inclinación de Tangentes una capacidad de carga máxima de 39,8 Tn también en el pilote N° 4. Desde la Fig. 6 a la Fig. 10 se tienen los resultados obtenidos al aplicar los diferentes métodos.

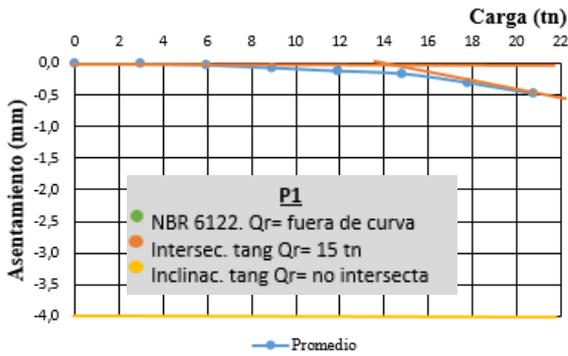


Fig. 6. Aplicación de métodos experimentales en P1.

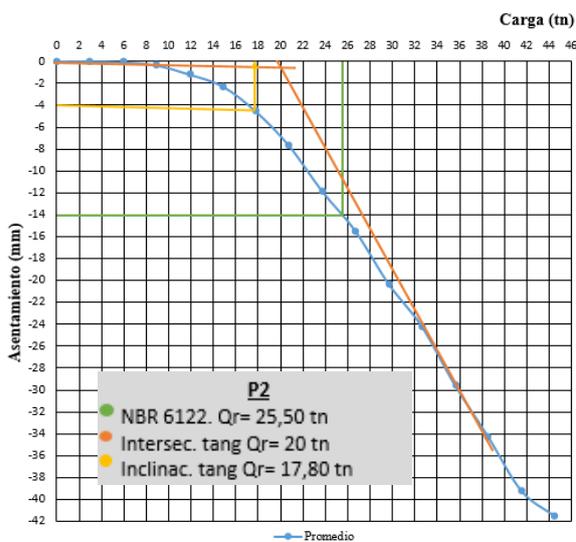


Fig. 7. Aplicación de métodos experimentales en P2.

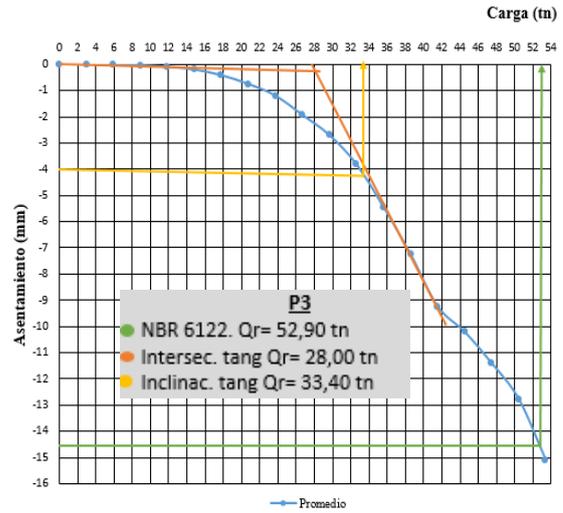


Fig. 8. Aplicación de métodos experimentales en P3.

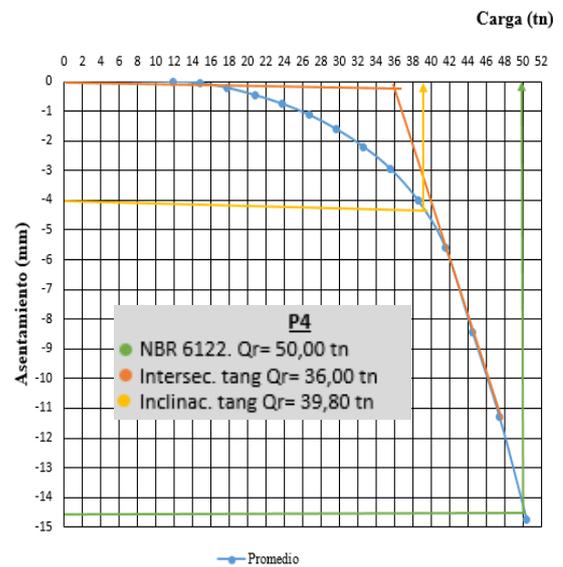


Fig. 9. Aplicación de métodos experimentales en P4.

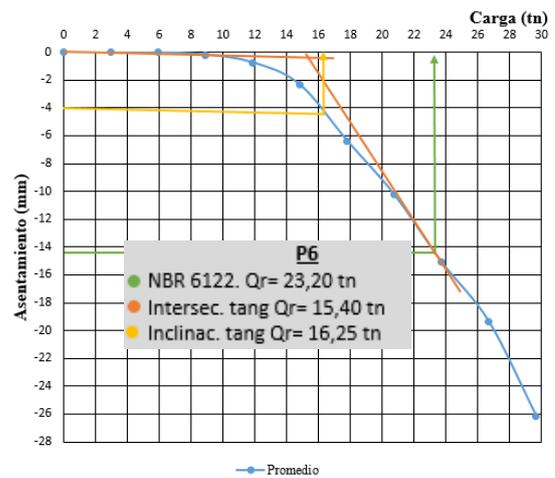


Fig. 10. Aplicación de métodos experimentales en P6.

5. Conclusiones

Finalmente se puede considerar que los valores obtenidos por el método de Aoki & Velloso, basados en los resultados del ensayo SPT, arrojan resultados inferiores a los alcanzados experimentalmente para los pilotes; en cambio los valores alcanzados por el método de Decourt & Quaresma se aproximan a los valores obtenidos por los métodos experimentales.

Los resultados son aplicables en suelos cuyas características geotécnicas sean semejantes a las del suelo del campo experimental de fundaciones de la Universidad Nacional de Itapúa, caso contrario será necesario realizar un ensayo de SPT con la finalidad de obtener las características del suelo como así también una prueba de carga en la zona que se pretende realizar las fundaciones, para conocer los respectivos valores de carga de rotura.

6. Referencias

- [1] ABNT NBR 6484. *Solo – Sondagen de simples reconhecimento con SPT – Método de ensaio*. Brasil: ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 2001.
- [2] Aoki, N. & Velloso, D. A. *An approximate method to estimate the bearing capacity of piles*. Buenos Aires: V PCSMFE, Vol.5, pp. 373-388, 1975.
- [3] Décourt, L. & Quaresma, A. R. *Capacidade de carga de estacas a partir de valores SPT*. Río de Janeiro: Proc. VI COBRAMSEF, 1978.
- [4] ABNT NBR 12131. *Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio*. Brasil: ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 1991.
- [5] ABNT NBR 6122. *Projeto de execução de fundações*. Brasil: ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 1996.
- [6] Juárez B. E; Rico R. A. *Mecánica de Suelos, Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos*. México, DF: Limusa SA, Vol. II, 2003.
- [7] Novas, L. A. *Estacas escavadas de pequeno diámetro nos solos argilosos da formação "Libertad", Uruguai*. Tesis de Maestría, Universidade Federal do Rio Grando do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2002. -