

# EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA CAPACIDAD DE CARGA EN CIMENTACIONES PROFUNDAS. FÓRMULAS ANALÍTICAS Y ENSAYOS DE CARGA

## COMPARATIVE EVALUATION OF LOAD CAPACITY IN DEEP FOUNDATIONS. ANALYTICAL FORMULATIONS AND LOAD TESTS

ANGELA PATRICIA BARRETO MAYA

*Magister en Ingeniería-Geotecnia, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, apbarret@unal.edu.co*

YAMILE VALENCIA GONZÁLEZ

*Doctora en Geotecnia, Profesora Asociada, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, yvalenc0@unal.edu.co*

OSCAR ECHEVERRI RAMÍREZ

*Magister en Geotecnia, Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, oecheve@unal.edu.co*

Recibido para evaluación: 13 de Diciembre de 2012 / Aceptación: 19 de Junio de 2013 / Recibida versión final: 02 de Julio de 2013

**RESUMEN:** La metodología convencional de diseño en cimentaciones profundas está regida por el cálculo de expresiones matemáticas basadas en principios teóricos de la mecánica de suelos, con el fin de dimensionar elementos con un factor de seguridad apropiado contra la falla por capacidad de carga, o por asentamientos que pongan en riesgo la estructura. Sin embargo, los valores arrojados en los cálculos matemáticos son en general conservadores al compararlos con los valores medidos en ensayos de carga, ensayos que habitualmente no son realizados. En este artículo se presentan los resultados obtenidos al analizar ensayos de carga con relación a cálculos de diseño sobre 10 pilotes, con el fin de establecer cuál o cuáles de las metodologías de diseño, refleja de manera más adecuada las condiciones geotécnicas de nuestros suelos.

**PALABRAS CLAVE:** Fundaciones profundas, prueba de carga, asentamiento, diseño, capacidad de carga.

**ABSTRACT:** The conventional design methodology in deep foundations is governed by the calculation of mathematical expressions based on theoretical principles of soil mechanics, in order to dimension the elements with an appropriate safety factor against bearing capacity failure or settlements that put the structure at risk. However, the values produced in the mathematical calculations are generally conservative when they are compared with the measured values of load test, taking into account that this type of testing is not usually performed. This article presents the results obtained by analyzing load tests, in relation to design calculations of 10 piles; with the purpose of establishing which of the design methodologies more adequately reflects the geotechnical conditions of our country.

**KEYWORDS:** Deep foundations, load test, settlement, design, load capacity.

### 1. INTRODUCCIÓN

Es de vital importancia comprender y calcular con precisión la capacidad de carga en cimentaciones profundas ya que éstas son de común uso cuando la magnitud de las cargas es elevada, o los suelos superficiales no tienen suficiente capacidad de soporte. Autores como Terzaghi, Hansen, Meyerhof, Vesic y Janbu entre otros, proponen expresiones matemáticas cuyos parámetros geotécnicos tales como: ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), cohesión ( $c$ ), densidad húmeda ( $\gamma_h$ ), humedad natural ( $w$ ) y la resistencia

a la penetración estándar ( $N_{spt}$ ), deben conocerse para estimar la capacidad de carga. Sin embargo, existen diferencias entre éstas, por las distintas concepciones acerca de los factores de capacidad de carga, la forma y dimensiones de los elementos y los mecanismos de falla propuestos en cada una. Todo esto genera incertidumbre con relación a la definición de la metodología más apropiada, la precisión de los cálculos, y evidencia la necesidad de optimizar los diseños. Desafortunadamente, no siempre se dispone de estudios detallados que representen las complejas condiciones geotécnicas imperantes en

nuestro territorio y esta situación pone de manifiesto la importancia que tiene la realización de ensayos de carga.

En este artículo, se presenta una evaluación comparativa de la capacidad de carga en 10 pilotes para diferentes zonas del país, a través de los resultados obtenidos en pruebas de carga y varias metodologías analíticas de diseño. La información empleada fue producto de una recopilación de datos suministrados por empresas acreditadas en el medio local, y comprende de manera sintetizada estudios de suelos que permitieron establecer los perfiles estratigráficos junto a las propiedades mecánicas que los caracterizan, los cuales están ampliamente documentados en Barreto (2011). En la mayoría de los estudios obtenidos, se consignan muy pocos resultados de ensayos de laboratorio para caracterizar los parámetros mecánicos de los suelos, y en algunos casos sólo se contó con los resultados de resistencia a la penetración estándar, evidenciando la limitante que se tiene para analizar a cabalidad aspectos representativos del suelo por falta de información específica, mostrando una realidad en la práctica ingenieril de nuestro país. Sin embargo, para la investigación realizada los valores que no arrojaron los estudios, fueron obtenidos o calculados según experiencias o formulaciones ya existentes, y en aquellas donde no se hizo posible determinar algunos valores de manera confiable, no se incluyeron, justificando la poca cantidad de ensayos que permitiera realizar una calibración a nivel regional, que tanto se requiere.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los procedimientos de cálculo tendientes a estimar la capacidad de una cimentación profunda, están asociados con la resistencia al corte del suelo y con el control de los asentamientos. A continuación se discuten tres metodologías empleadas en el cálculo de capacidad de carga en cimentaciones profundas, y que fueron empleadas en esta investigación:

### 2.1. Métodos empíricos o semi-empíricos

En la actualidad, este tipo de metodologías son en general muy empleadas y difundidas en todo el mundo. El ensayo de resistencia a la penetración estándar, cuyos resultados se asocian a los parámetros de resistencia por fricción de los suelos, encierra un alto grado de empirismo y por ende tiene un carácter regional; pero

de igual forma, ha sido aplicado por muchos autores que proponen métodos de cálculo de capacidad de carga en pilotes con base en correlaciones empíricas de resultados de ensayos “in situ” y ajustados con pruebas de carga. Para esta investigación, se realizaron cálculos de capacidad de carga de acuerdo con tres métodos semi-empíricos propuestos por: Aoki-Velloso (1975), Décourt-Quaresma (1978) y Teixeira (1996) citados por Pousada y Carreiro (2004) y por Cintra y Aoki (2010), los cuales son ampliamente utilizados en proyectos de fundaciones en Brasil, cuyos suelos son de origen tropical (*son comúnmente llamados suelos tropicales, aquellos que ocurren entre los trópicos, paralelos 30° N y 30° S de latitud, y presentan propiedades ingenieriles particulares diferentes de aquellas características de los suelos de regiones templadas*) como los suelos colombianos. (Camapum de Carvalho, 2004).

### 2.2. Métodos analíticos (estáticos)

Están basados en principios teóricos que procuran determinar la capacidad de carga de un pilote o la definición inicial de las longitudes y de las secciones transversales de los pilotes durante la etapa de diseño. La expresión habitualmente utilizada para el cálculo de capacidad de carga última de un pilote individual denominada “Qult”, es definida como el aporte desarrollado por la punta del elemento (Qpunta) más la fricción generada (Qfricción) en el fuste del mismo (Ecuación 1.1):

$$Q_{ult} = Q_{fricción} + Q_{punta} \quad (1.1)$$

$$Q_{punta} = A_p \times q_p, \quad Q_{fricción} = A_f \times q_f \quad (1.2)$$

Dónde:  $A_p$ : área de la base del pilote;  $A_f$ : área perimetral del fuste donde se genera la fricción lateral,  $q_p$ : resistencia de punta,  $q_f$ : resistencia por fricción lateral.

De la ecuación (1.2), son los términos  $q_p$  y  $q_f$ , donde se centran las diferencias de las expresiones matemáticas, principalmente por la forma como los evalúa cada autor; se utilizan factores que fueron obtenidos a partir de ensayos, para condiciones específicas de suelos, y por ende para superficies de falla distintas, por lo que al hacer uso de ellas, se deben conocer sus hipótesis de partida y su origen para así determinar su aplicabilidad. Para efectos de esta investigación, se tomaron las metodologías de Terzaghi (1943),

Meyerhof (1963), Hansen (1970), Vesic (1975), Janbu (1976), y Coyle - Castello (1981) para hallar la capacidad de carga teórica por punta, y la fórmula de resistencia al corte en la zona de interfase suelo-pilote (denominada fórmula conservadora y no conservadora en el presente trabajo) junto a los métodos  $\lambda$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  (adherencia pilote-suelo) para la resistencia friccional. Las metodologías anteriormente mencionadas fueron extraídas de la bibliografía de Das (2006); Londoño (2001) y Bowles (1997), cuyos fundamentos teóricos se encuentran sintetizados en Barreto (2011).

### 2.3. Pruebas de carga

Su finalidad radica en experimentar a escala real, el comportamiento de un pilote bajo la acción de las cargas y determinar su capacidad última. Su inconveniente fundamental se debe a su elevado costo y al tiempo requerido para su realización. Las pruebas de cargas pueden ser estáticas o dinámicas. Los ensayos estáticos se pueden realizar construyendo una plataforma o cajón

en la cabeza del pilote para aplicar incrementos de carga mediante gatos hidráulicos. La reacción del gato se consigue mediante una plataforma cargada o con una viga conectada a pilotes que trabajen a tracción. Por otra parte, los ensayos dinámicos, consisten en dejar caer desde una altura determinada, el martillo de hincas sobre la cabeza de un pilote instrumentado; la capacidad de carga se estima con modelos matemáticos, que utilizan la ecuación de onda y simulan el comportamiento del pilote y su interacción con el suelo.

#### 2.3.1. Interpretación de resultados de pruebas de carga

Los resultados de pruebas de carga requieren de una interpretación cuidadosa. La Figura 1 muestra distintas representaciones gráficas de los resultados. Un criterio de interpretación se refiere a la gráfica de la curva “carga vs asentamiento” la cual muestra un cambio brusco en la pendiente del tramo de carga, sin embargo, en muchos casos, la pendiente varía gradualmente, sin que se pueda establecer en forma clara la carga de rotura (Figura 1a).

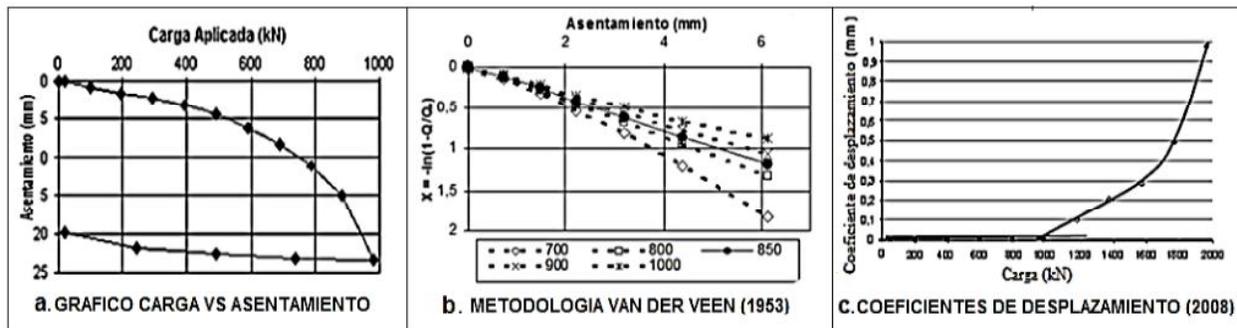


Figura 1. Distintas representaciones de resultados de pruebas de carga

Otra metodología analizada es la propuesta por Van der Veen (1953) que se utiliza para estimar la ruptura a partir de la extrapolación de los valores de las curvas obtenidas en pruebas de carga. Ésta metodología ajusta el gráfico resultante de la prueba de carga a una curva con una formulación exponencial a partir de la ecuación:

$$Q = Q_u (1 - e^{-\alpha s}) \quad (1.3)$$

Dónde:  $s$ : asentamientos obtenidos para la carga  $Q$  durante la prueba,  $\alpha$ : coeficiente que define la forma de la curva y  $Q_u$ : carga resultante de varios tanteos.

Para desplazamientos grandes, la curva se torna asintótica a una recta vertical definida como un

límite de carga denominado  $Q_u$  (Figura 1b), que será determinado al realizar tanteos con diferentes valores, hasta que la función tienda a ser lineal (Valencia et al, 2008).

La tercera metodología denominada “Método de los coeficientes de desplazamientos”, extrae los coeficientes de la pendiente de la parte final lineal, de las curvas de asentamiento (en mm) vs tiempo en escala logarítmica, y que posteriormente son dibujados en relación a las cargas. De acuerdo con los gráficos obtenidos, el punto de encuentro o puntos de inflexión entre las líneas de tendencia trazadas en la figura “carga aplicada vs. coeficiente de desplazamiento” (tangentes a la curva) definirían el inicio de deformaciones

plásticas (Valencia, et al; 2008). Entonces, se pueden evidenciar tres segmentos de línea recta (Figura 1c): la primera, corresponde a la movilización de la interfaz pilote-suelo por la fricción lateral; el segundo, a la movilización inicial de la punta del pilote junto con el fuste y finalmente el tercero, a la etapa de plastificación del suelo en que se apoya la punta del pilote o pila.

### 3. ELEMENTOS EVALUADOS

Los elementos evaluados comprenden 10 pilotes ubicados en diferentes sectores del país, los cuales representan los tres mecanismos de transferencia de carga (fuste-punta, fricción lateral y punta).

Cabe aclarar, que la información analizada se manejó de forma confidencial respetando la petición de las empresas, por lo que los nombres de los elementos utilizados fueron modificados y abreviados. Las primeras 5 pruebas de carga evaluadas (KO, TO; NO; VC; N92) fueron realizadas en elementos de similares condiciones constructivas ejecutadas en la ciudad de Cartagena, ya que pertenecen al mismo proyecto de ingeniería. Las siguientes dos pruebas (NV; CK) se ejecutaron en pilotes cimentados sobre suelos de Antioquia, los cuales a pesar de pertenecer al mismo departamento tiene consideraciones mecánicas distintas. Posteriormente, se evaluaron dos pruebas (AP; AK) que fueron realizadas en la ciudad de Bogotá, las cuales presentan diferencias constructivas y por ende, el comportamiento geotécnico es diferente además de su mecanismo de transferencia de carga. Adicionalmente, otra prueba de carga fue elaborada en la ciudad de Barranquilla (MPA), la cual se analizó de manera distinta debido a que en este caso el suelo de fundación corresponde a material rocoso, cuyo mecanismo de transferencia de carga se genera en la punta, y por ende los métodos analíticos para el cálculo de capacidad total difieren de aquellos elementos en los cuales la carga segura es debida, en mayor proporción, al aporte por fricción sobre el fuste.

### 4. EVALUACIÓN COMPARATIVA DE RESULTADOS DE PRUEBAS DE CARGA Y ESTIMATIVOS DE CAPACIDAD TEÓRICA

Una primera valoración del comportamiento en los elementos de fundación fue realizada con la información geotécnica suministrada para establecer los perfiles estratigráficos, junto con los parámetros

mecánicos que los caracterizan (Barreto, 2011). Posteriormente, se estudiaron los resultados obtenidos en las pruebas de carga, donde inicialmente se pudo revisar el tipo de falla que experimenta el conjunto suelo-pilote, y por ende su comportamiento geotécnico durante todo el proceso mediante el gráfico de la curva de carga vs asentamiento. Luego, se aplicaron las metodologías propuestas por Van der Veen (1953) y Valencia et al (2008) que establecen una interpretación o criterio de falla en la fundación; y además, con base en los desplazamientos experimentados y representados en el gráfico de la curva de carga vs asentamiento se corroboró si los valores obtenidos por dichas metodologías eran valores admisibles o de rotura, para finalmente considerar un valor admisible de la prueba de carga ( $Q_{real (prueba)}$ ) y posteriormente compararlo con los valores teóricos calculados ( $Q_{diseño}$ ).

En cuanto a los valores de capacidad teórica, se hizo necesario definir una serie de combinaciones que incorporaran el aporte por punta y fuste, cuyo resultado fue determinado como el valor de “capacidad de diseño” ( $Q_{diseño}$ ). Se consideró un número prudente de combinaciones (Tabla 1) que reflejaran las condiciones más desfavorables de acuerdo con las magnitudes arrojadas en los cálculos y el funcionamiento de los elementos de fundación.

Para una fácil interpretación de la siguiente Tabla, es necesario aclarar la denominación de los términos *Fórmula conservadora* y *Fórmula no conservadora*, como metodologías de diseño para el cálculo de capacidad de carga en el fuste. La resistencia por friccional lateral  $q_f$  definida anteriormente en la ecuación 1.2, define que la capacidad corresponde a la adición entre la resistencia al corte de la masa de suelo en la interfase suelo-estructura ( $f = K_o \sigma'_0 \tan \delta$ ) y la adherencia entre ambos elementos influenciado por la cohesión del suelo ( $Ca = Métodos \alpha$  o  $\lambda$ ). El primer término, es definido como *Fórmula no conservadora* ya que esta define la expresión general de la resistencia al corte entre suelo-estructura. Sin embargo, para suelos friccionantes, algunos autores como Das, 2006 han planteado que dicha resistencia se limita con la profundidad al existir una longitud crítica ( $L_c$ ) en la cual ésta crece y después se mantiene constante, castigando la expresión no conservadora considerada (definida como *Fórmula conservadora*).

Tabla 1. Métodos de cálculo de capacidad

COMBINACIONES O METODOS APLICADOS PARA EL CALCULO DE CAPACIDAD DE DISEÑO (METODOS ANALITICOS)			
No	FUSTE		PUNTA
	Fricción	Adherencia	
1	<i>Fórmula no conservadora</i>	$\lambda$	Meyerhof (1963), Hansen (1970)
2	Fórmula conservadora	$\lambda$	Meyerhof (1963), Hansen (1970)
3	<i>Fórmula no conservadora</i>	a	Meyerhof (1963), Hansen (1970)
4	Fórmula conservadora	a	Meyerhof (1963), Hansen (1970)
5	<i>Fórmula no conservadora</i>	$\lambda$	Vesic (1975)
6	Fórmula conservadora	$\lambda$	Vesic (1975)
7	<i>Fórmula no conservadora</i>	a	Vesic (1975)
8	Fórmula conservadora	a	Vesic (1975)
9	<i>Fórmula no conservadora</i>	$\lambda$	Terzaghi (1943)
10	Fórmula conservadora	$\lambda$	Terzaghi (1943)
11	<i>Fórmula no conservadora</i>	a	Terzaghi (1943)
12	Fórmula conservadora	a	Terzaghi (1943)
13	<i>Fórmula no conservadora</i>	$\lambda$	Janbu (1976)
14	Fórmula conservadora	$\lambda$	Janbu (1976)
15	<i>Fórmula no conservadora</i>	a	Janbu (1976)
16	Fórmula conservadora	a	Janbu (1976)
17	<i>Fórmula no conservadora</i>	$\lambda$	Spt Meyerhof
18	Fórmula conservadora	$\lambda$	Spt Meyerhof
19	<i>Fórmula no conservadora</i>	a	Spt Meyerhof
20	Fórmula conservadora	a	Spt Meyerhof
21	<i>Fórmula no conservadora</i>	$\lambda$	Coylle Castello (1981)
22	Fórmula conservadora	$\lambda$	Coylle Castello (1981)
23	<i>Fórmula no conservadora</i>	$\alpha$	Coylle Castello (1981)
24	Fórmula conservadora	$\alpha$	Coylle Castello (1981)
25	NSpt (N70 Meyerhof)		NSpt (N70 Meyerhof)
26	<i>Fórmula no conservadora</i>		Coylle Castello (1981)

En los cálculos que se presentan se consideraron ciertos aspectos para definir las combinaciones, algunos de ellos son: 1) A pesar de que la metodología  $\lambda$  (Das, 2006) es aplicable a pilotes metálicos, se consideró para elementos de concreto con el fin de evaluar su sensibilidad y aplicabilidad con relación a lo avalado por su autor; 2) Para el cálculo de capacidad en la punta, se decidió despreciar la cohesión de los materiales presentes, por no tener una información confiable sobre éste parámetro.

Finalmente,  $Q_{real}$  y  $Q_{diseño}$  se comparan de acuerdo con la expresión 1.4 que establece si el método de diseño subestima (relación  $>1$ ) o sobrestima (relación  $<1$ ) la verdadera capacidad de carga en cada pilote:

$$\frac{Q_{real} \text{ (prueba)}}{Q_{diseño}} \quad (1.4)$$

Actualmente, en la práctica del diseño es común emplear factores de seguridad superiores en la punta que para el fuste, ya que el mecanismo de trabajo, las

consideraciones asumidas en las formulaciones teóricas, y los desplazamientos necesarios para desarrollar al máximo la resistencia por fricción lateral o punta, son diferentes. Por ende, ya que son frecuentemente utilizados en el país, se consideran para el cálculo de las capacidades de diseño, factores de seguridad de 3 para el aporte por punta y de 2 para la componente por fricción. Sin embargo, en las metodologías semi-empíricas usadas en Brasil, se contemplan factores de seguridad distintos a los referidos anteriormente. Por tanto, las propuestas de Velloso (1975), Quaresma (1978) y Texeira (1996), consideran magnitudes recomendadas por sus propios autores y que son consignadas en la bibliografía de Pousada y Carreiro, (2004).

**4.1. Grupo de pilotes que trabajan de manera conjunta (punta + fuste)**

Uno de los siete elementos estudiados según este comportamiento fue el pilote KO que corresponde a un elemento de concreto ( $f'c = 5000$  psi), con sección cuadrada (0.35x0.35m) y 15,0 m de longitud. El perfil estratigráfico local se ilustra en la Figura 2, el cual representa que la capacidad total del elemento podría activarse de manera secuencial, desarrollándose primero por el fuste, teniendo en cuenta que los materiales adyacentes son finos y necesitarían pocos desplazamientos para su desarrollo, mientras que para la punta son mucho mayores. De la misma forma, fueron analizados la totalidad de los elementos evaluados; el reporte completo puede consultarse en Barreto (2011).

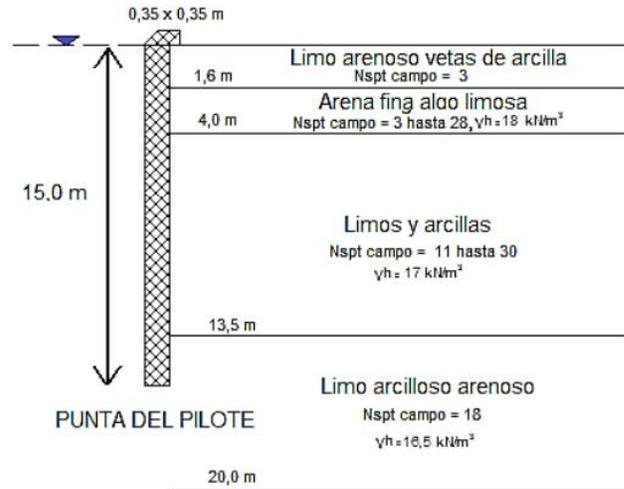


Figura 2. Perfil de suelo atravesado por KO

**4.1.1. Capacidad de carga admisible según ensayo de carga**

El ensayo de carga se realizó tiempo después de haber hincado el pilote. Cabe aclarar que no se llevó a la rotura porque el pilote sería posteriormente usado en la obra. De acuerdo con el informe suministrado, el ensayo comprendió dos ciclos de carga: en el primero se llevó el sistema hasta una carga de trabajo de 400 kN, realizando incrementos sucesivos; y en el segundo hasta 1000 kN, donde se partió desde una carga de 300 kN y se ejecutaron los incrementos respectivos.

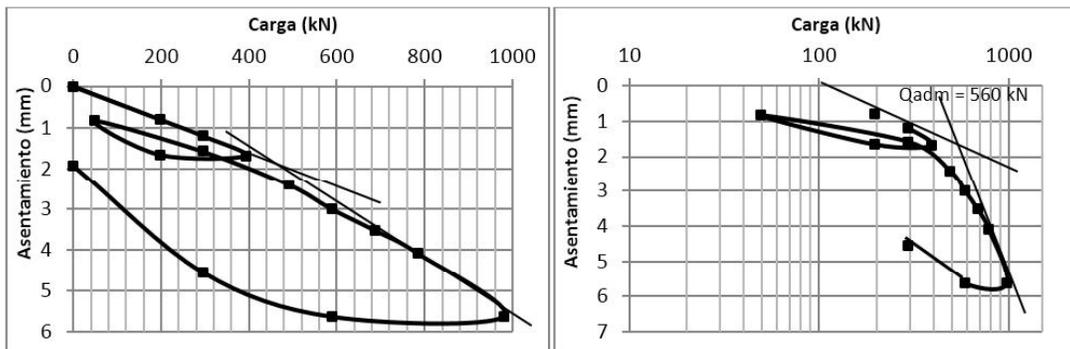


Figura 3. Curva de carga vs asentamiento en escala aritmética y semi-logarítmica (KO)

Al observar la Figura 3, es posible notar un tramo inicial que corresponde a un primer ciclo de carga que representa un comportamiento elástico; el tramo inicial del segundo ciclo se comporta paralelo a la curva del

primero, mostrando la recompresión del suelo. Además, se puede visualizar el inicio de los desplazamientos plásticos, que se ubican en torno de 560 kN, punto donde se intersectan las líneas tangentes a las curvas

inicial y final. La ruptura del sistema no se visualiza aunque al prolongar la curva obtenida con el fin de percibir la falla del suelo contiguo al pilote se podría interpretar una capacidad última de la fundación para una carga mucho mayor.

Por otra parte, al aplicar la metodología de los “coeficientes de desplazamiento” (Figura 4a) se percibe que existen dos variaciones de comportamiento: una en 300 kN y la otra en 600 kN. El primer tramo corresponde a la interacción entre las paredes del pilote y del suelo, interpretándose que el fuste trabaja hasta este punto en un rango pseudo- elástico; y a partir de

300 kN se inicia la movilización de la punta de forma simultánea con el fuste, hasta el punto donde se inicia la plastificación de todo el conjunto (alrededor de los 600 kN).

Al comparar con los resultados obtenidos al aplicar la metodología anterior, es posible asumir una carga admisible ya que las plastificación final del conjunto (la falla) no sería tan abrupta, mostrando que se necesitaría muchísima más carga de la aplicada para llegar al estado en que la base de la fundación este completamente plastificada.

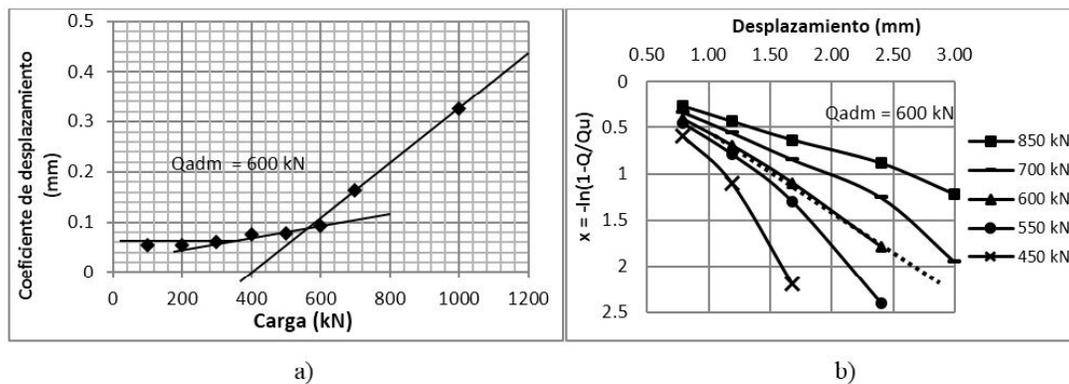


Figura 4. a) Gráfico de coeficientes de desplazamiento y b) Vander Veen

Con referencia a los resultados expresados en la Figura 4b, basados en el método de Van der Veen, se puede apreciar la coherencia entre las metodologías aplicadas, ya que la magnitud de la carga para la cual la función toma un valor lineal corresponde a 600 kN.

Resumiendo todos los resultados arrojados por las metodologías aplicadas, se observa en la Tabla 2 que éstos son coherentes y muy similares entre sí; presentando un Coeficiente de Variación = 0,03.

Tabla 2. Relación entre capacidad real vs capacidad de diseño par pilote KO

RESULTADOS PRUEBA DE CARGA						
PILOTE	CARGA DETERMINADA POR EL METODO (KN)			VARIACION DE RESULTADOS OBTENIDOS		
	Carga vs asentamiento	Van der Veen (1953)	Coefficiente de desplazamiento (2008)	Media (kN)	Desviación estandar (kN)	Coefficiente de variación
KO	560	600	600	587	19	0,03

#### 4.1.2. Evaluación comparativa por métodos teóricos vs ensayo de carga

En la Tabla 3 se relacionan todas las magnitudes calculadas de capacidad teórica obtenidas según las

combinaciones de metodologías definidas en la Tabla 1 (Método No 1 al 26) para ser comparadas con el valor determinado como capacidad real  $Q_{real(prueba)} = 587kN$ , obtenida mediante la media de cada una de las metodologías de análisis del ensayo de carga:

**Tabla 3.** Relación entre capacidad real vs capacidad de diseño par pilote KO

<b>RELACION ENTRE CAPACIDAD REAL (PRUEBA DE CARGA) VS CAPACIDAD DE DISEÑO (METODOS TEORICOS) PARA PILOTE KO</b>					
<i>Q<sub>real(prueba)</sub> = 587 kN</i>					
<b>Método</b>	<b>Q última Punta (kN)</b>	<b>Q última Fuste (kN)</b>	<b>Q diseño (kN) FS<sub>p</sub> = 3, FS<sub>f</sub> = 2</b>	<b>Q<sub>real</sub> (prueba)/ Q<sub>diseño</sub></b>	<b>Diseño de la fundación</b>
1	301	707	454	1,3	<i>Subestimado</i>
2	301	553	377	1,6	<i>Subestimado</i>
3	301	589	395	1,5	<i>Subestimado</i>
4	301	434	317	1,8	<i>Subestimado</i>
5	531	707	530	1,1	<i>Subestimado</i>
6	531	553	453	1,3	<i>Subestimado</i>
7	531	589	471	1,2	<i>Subestimado</i>
8	531	434	394	1,5	<i>Subestimado</i>
9	225	707	428	1,4	<i>Subestimado</i>
10	225	553	351	1,7	<i>Subestimado</i>
11	225	589	369	1,6	<i>Subestimado</i>
12	225	434	292	2,0	<i>Subestimado</i>
13	339	707	466	1,3	<i>Subestimado</i>
14	339	553	389	1,5	<i>Subestimado</i>
15	339	589	407	1,4	<i>Subestimado</i>
16	339	434	330	1,8	<i>Subestimado</i>
17	280	707	447	1,3	<i>Subestimado</i>
18	280	553	370	1,6	<i>Subestimado</i>
19	280	589	388	1,5	<i>Subestimado</i>
20	280	434	310	1,9	<i>Subestimado</i>
21	313	707	458	1,3	<i>Subestimado</i>
22	313	553	380	1,5	<i>Subestimado</i>
23	313	589	399	1,5	<i>Subestimado</i>
24	313	434	321	1,8	<i>Subestimado</i>
25	280	215	201	2,9	<i>Subestimado</i>
26	313	341	275	2,1	<i>Subestimado</i>
Media	329	548	384	1,6	
Desviación estándar	93	123	71	0,4	
Coefficiente de variación	0,28	0,22	0,18	0,2	

Los resultados obtenidos muestran que la metodología No 5 es la más cercana al valor del ensayo de carga y la No 25 la más alejada, subestimando la capacidad

del elemento hasta por más de dos veces. Cabe anotar, que numéricamente la No 5 indica la mejor aproximación a lo obtenido por la prueba de carga;

sin embargo, como esta metodología considera a  $\lambda$  en la capacidad friccional, se debe tener presente las bases de su teoría, por lo que resulta contraproducente afirmar su aplicabilidad (teoría fundamentada por Vijayvergiya y Fotch (1972) y citado por Das, 2006 cuya hipótesis está relacionada con el desplazamiento del suelo causado por el hincado de pilotes con perfil metálico y no de concreto, como los trabajados). Por

tanto, se puede decir que el estimativo de capacidad de carga más ajustado a los resultados de la prueba de carga, es el obtenido al aplicar la metodología No 7. Las metodologías No 25 y 26 no consideran el aporte por adherencia y subestiman en gran proporción la capacidad de carga. Otra manera de representar los resultados se expresa mediante la Figura 5, donde es posible corroborar los argumentos expresados.

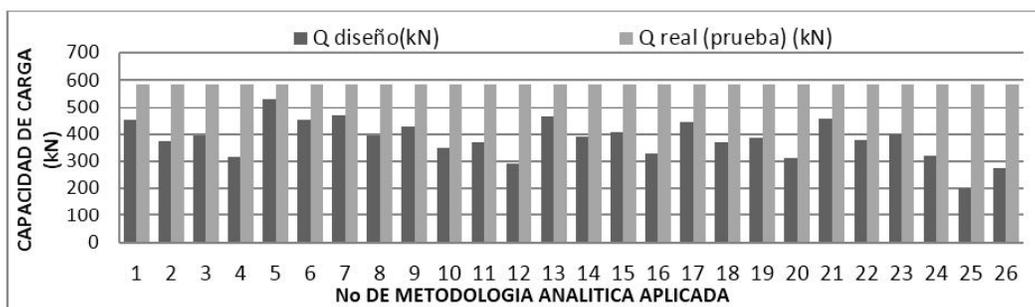


Figura 5. Capacidad real vs capacidad de diseño

### 4.1.3. Evaluación comparativa por metodologías semi-empíricas

En la Figura 6 se expresan las capacidades obtenidas por las tres metodologías (Velloso, Quaresma y

Texeira), y los factores de seguridad que emplean sus autores en el cálculo de la capacidad de carga del elemento de cimentación.

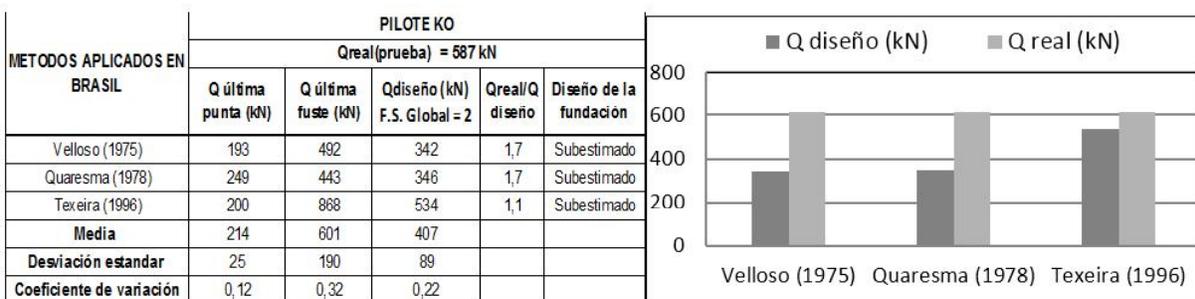


Figura 6. Metodologías semi-empíricas en KO

Con base en lo mostrado Figura 6, es tangible el cuidado que se debe tener al realizar cualquier tipo de cálculo de capacidad. Al comparar los valores tanto de capacidad última como admisible ( $Q_{diseño}$ ) y según lo arrojado en la prueba de carga, es posible verificar que las tres metodologías semi-empíricas aplicadas son consistentes. Sin embargo, las capacidades últimas teóricas presentan magnitudes menores a las obtenidas según el ensayo de carga, mostrando que las metodologías de diseño subestiman la capacidad del elemento de fundación. Por otra parte, y al comparar las

barras correspondientes a las magnitudes de capacidad real y de diseño, es posible determinar que el valor de capacidad de diseño al aplicar la metodología de Texeira (1996) es el más cercano al valor arrojado en la prueba de carga, mientras que la de Velloso (1975) resulta ser la más conservadora de todas, subestimando ampliamente la capacidad. Para los demás pilotes evaluados en la ciudad de Cartagena, los valores de capacidad real con respecto al diseño son superiores para todas las 26 combinaciones, lo cual se muestra en la Figura 7. Es posible detectar que la metodología No

5 sigue presentando la menor variación, sin embargo no es aplicable de acuerdo con lo argumentado para el pilote KO, indicando que la No 7 es la más similar al

diseño de los elementos; mientras que la No 25 es la que más subestima la capacidad.

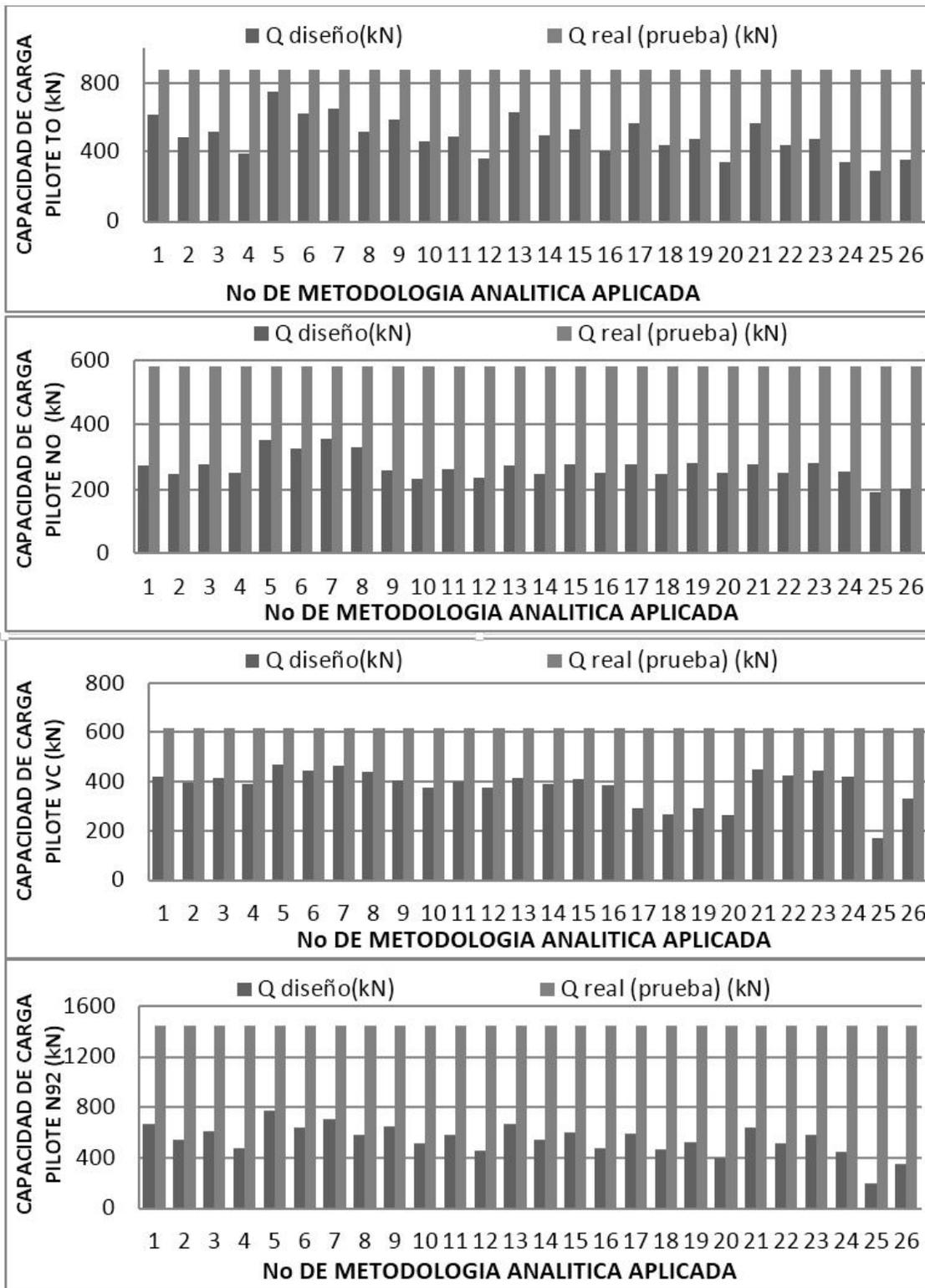


Figura 7. Capacidad teórica TO, NO, VC y N92

Por otra parte, al comparar el valor obtenido con los de las metodologías semi-empíricas (Figura 8), se observa una alta variabilidad en los resultados sin tendencia clara de comportamiento. Como ya se ha mencionado estos métodos son empíricos y son propuestos para las

condiciones locales de algunos suelos del Brasil donde los altos grados de intemperismo han dado lugar a la formación de materiales muy diferentes en su estructura y comportamiento mecánico a los presentes en la geografía colombiana.

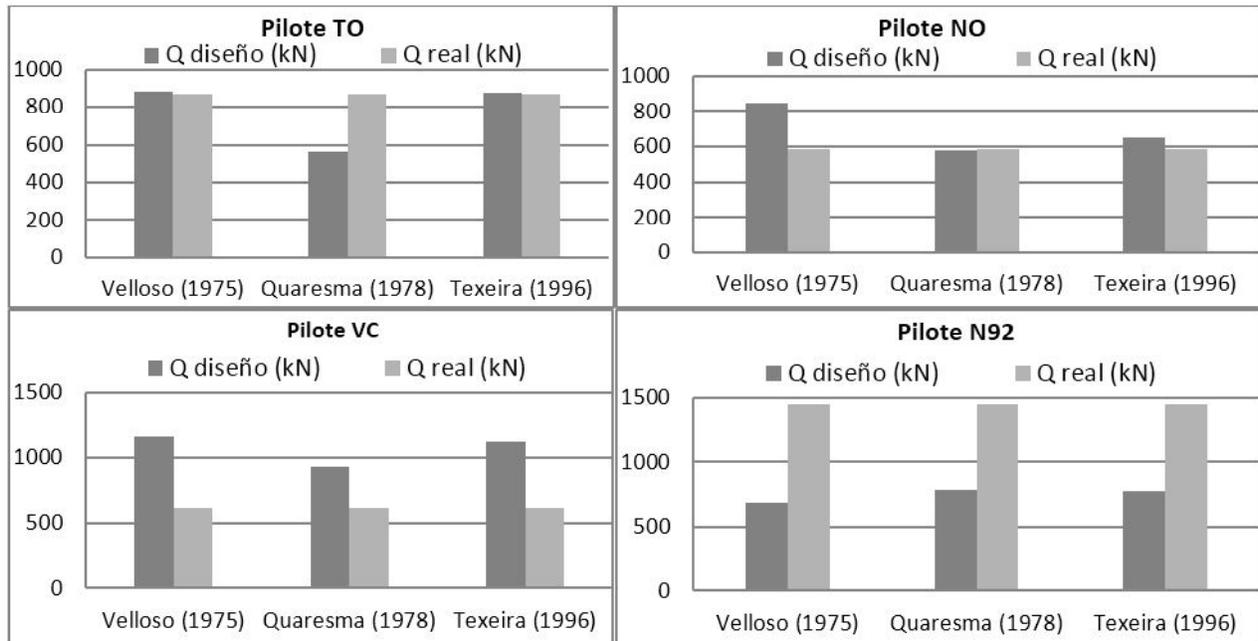


Figura 8. Evaluación con metodologías semi-empíricas

En los ensayos de carga sobre los elementos NV y CK (Medellín, Antioquia), se reportan asentamientos bajos ( $\approx 0,3$  mm), permitiendo percibir la rigidez del

suelo de fundación y por ende, una capacidad de carga considerable que las formulaciones teóricas no representan (Figura 9 y Figura 10).

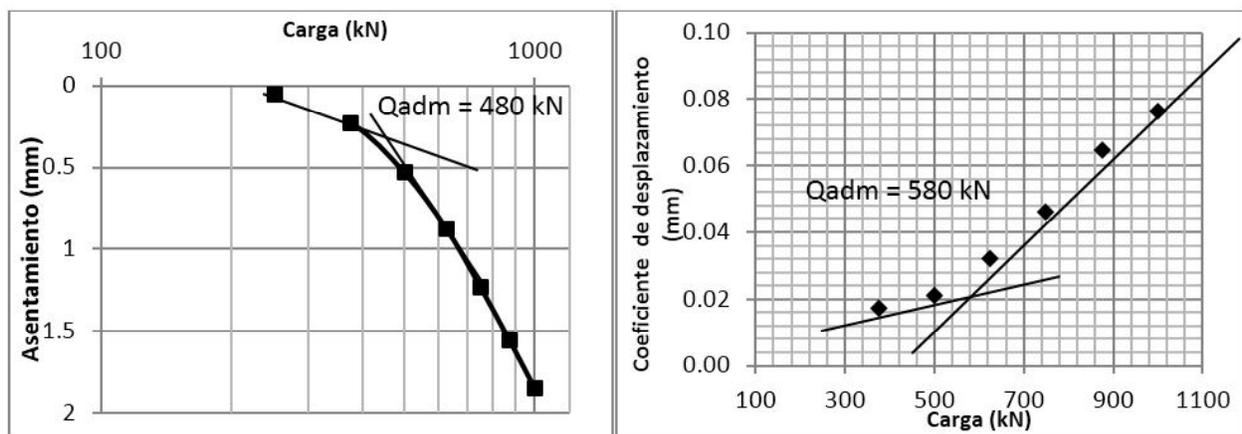


Figura 9. Representación de prueba en escala aritmética, método de los coeficientes de desplazamientos para NV

Sólo en las curvas de carga vs asentamiento en escala semi-logarítmica se pudo apreciar un leve cambio en la curvatura, además de mostrar que la capacidad

desarrollada solo es producida entre el fuste y el suelo, estableciendo que existe un margen de seguridad elevado.

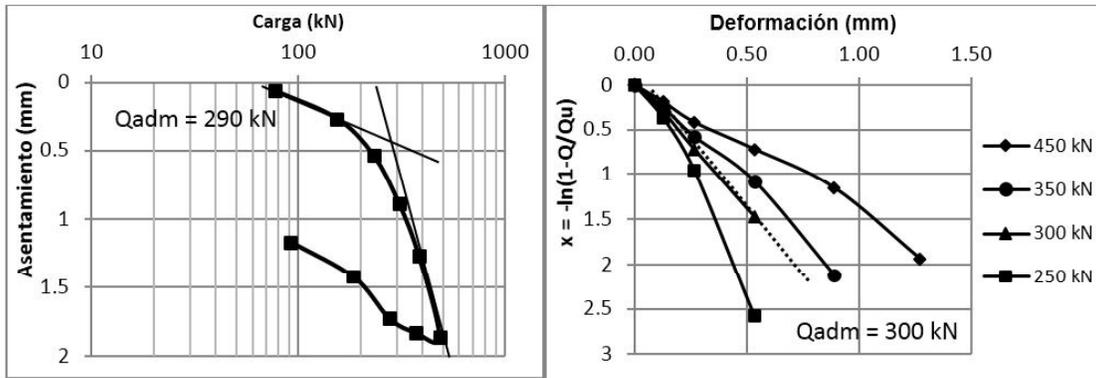


Figura 10. Representación de prueba en escala logarítmica y método de Van der Veen para CK

Los valores obtenidos según las metodologías semi-empíricas son mostrados en la Figura 11, donde se

puede verificar que en ambos casos se sobrestima la capacidad establecida a partir de los ensayos de carga.

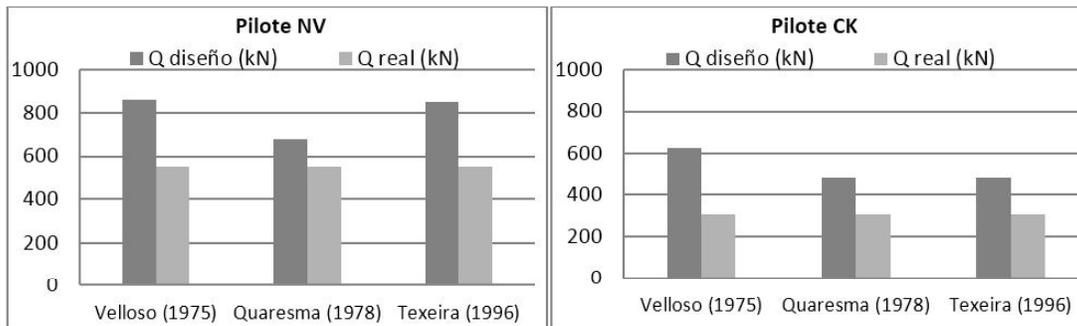


Figura 11. Métodos semi-empíricos (NV,CK)

4.2. Pilotes que trabajan por fuste

Estos pilotes están embebidos en suelos arcillosos y limosos de origen lacustre característicos de la sabana de Bogotá, proporcionando un escenario adecuado para la aplicación de elementos profundos que trabajan gracias a su capacidad friccional. Además, el aporte por punta es despreciable, a tal punto que puede disminuir a medida que la relación de esbeltez aumenta.

4.2.1. Capacidad de carga admisible según ensayo de carga

Al evaluar el comportamiento de la curva de carga vs asentamiento (Figura 12), se pudo apreciar la falla del sistema de fundación, con grandes desplazamientos a partir de cargas de 2500 y 3000kN. Además, al aplicar la hipótesis sobre la falla del elemento cuando el desplazamiento alcanza alrededor del 10% del diámetro (35 mm), se puede corroborar que la capacidad última está alrededor de dicha magnitud.

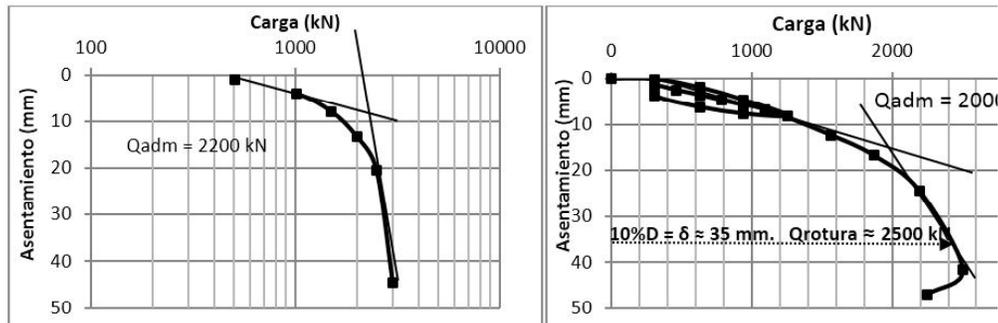


Figura 12. Representación de prueba en escala logarítmica de AP (izquierda) y de AK (derecha)

#### 4.2.2. Capacidad de carga calculada según métodos teóricos

Debido a las condiciones propias de estos suelos las capacidades de carga por métodos teóricos fueron calculadas de acuerdo con las técnicas basadas en la fricción lateral. Por tanto, las combinaciones para hallar los valores de capacidad admisible total para los elementos AP y AK fueron distintas a las

combinaciones utilizadas para los pilotes ya analizados. Éstas serán mostradas en la Tabla 4 y denominadas como método F1, F2,...F8. Como se puede apreciar, en dicha Tabla se considera el método  $\beta$  en las formulaciones referidas a la capacidad por fricción ya que la expresión matemática es la misma en relación al método no conservador, solo que este último considera el factor asociado al coeficiente de empuje que se ejerce según el método constructivo.

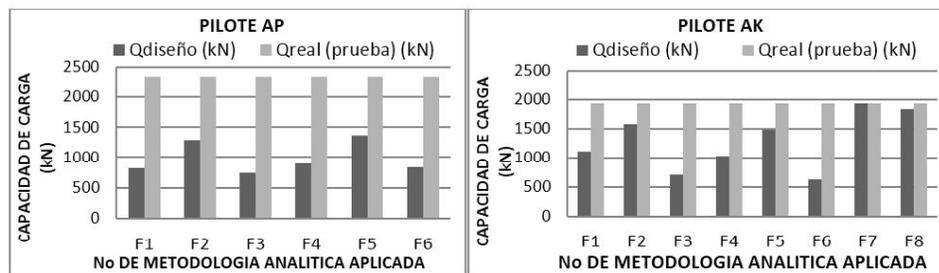
**Tabla 4.** Métodos de capacidad de diseño para suelos cohesivos

METODO	CAPACIDAD POR FUSTE	
	Fricción	Adherencia
F1	Formula conservadora	$\lambda$
F2	$\beta$	$\lambda$
F3	NSpt (N70 Meyerhof)	$\lambda$
F4	Formula conservadora	$\alpha$
F5	$\beta$	$\alpha$
F6	NSpt (N70 Meyerhof)	$\alpha$
F7	Formula no conservadora	$\lambda$
F8	Formula no conservadora	$\alpha$

Es importante anotar que en las formulaciones teóricas para el cálculo de la capacidad de carga no se tienen en cuenta factores de tipo constructivo que influyen directamente en el comportamiento del sistema suelo-pilote, como: el método de instalación (pilote vaciado “in situ” y pilote hincado), la sección transversal del pilote, que en el caso de ser vaciado posiblemente sea mayor debido a la presión ejercida por el concreto sobre las paredes de la excavación, está última situación apunta también a una mayor rugosidad en el contacto pilote-suelo.

#### 4.2.3. Evaluación comparativa por métodos teóricos vs ensayo de carga

De acuerdo con la Figura 13 se puede percibir que algunas metodologías teóricas son muy conservadoras. Para estos elementos, las metodologías F3 y F6 son influenciadas por las técnicas aplicadas, una de ellas (Penetración estándar) parte de una metodología que es usada en suelos de distinta condición mecánica (arenas), y los suelos donde se ubican los pilotes AP y AK, se caracterizan por tener materiales predominantemente cohesivos.



**Figura 13.** Capacidad teórica: AP y AK

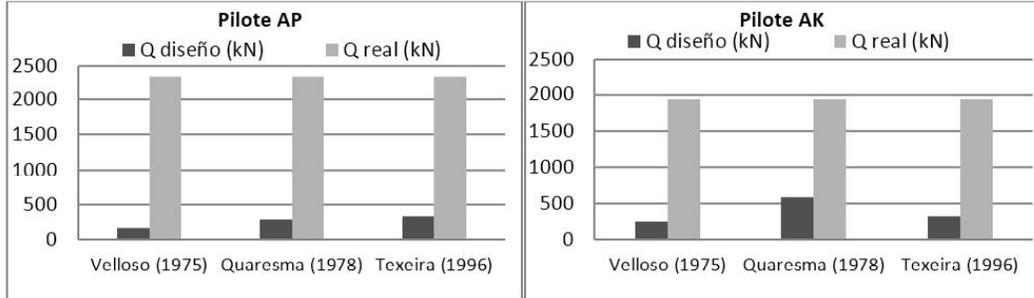
Como estos elementos tienen diferentes procedimientos constructivos, es claro que para cada uno de ellos hay una metodología más acorde al proceso constructivo. Para el caso del pilote AP (pre excavado), la metodología

F5 es quien representa la magnitud más cercana a la capacidad real, mientras que para el pilote AK (hincado) la más ajustada corresponde a la metodología F7.

**4.2.4. Evaluación comparativa por metodologías semi-empíricas**

A continuación es posible observar la discrepancia que presentan las tres metodologías utilizadas, mostrando

que éstas no son aplicables a las condiciones de los suelos blandos característicos de la sabana de Bogotá (Figura 14).



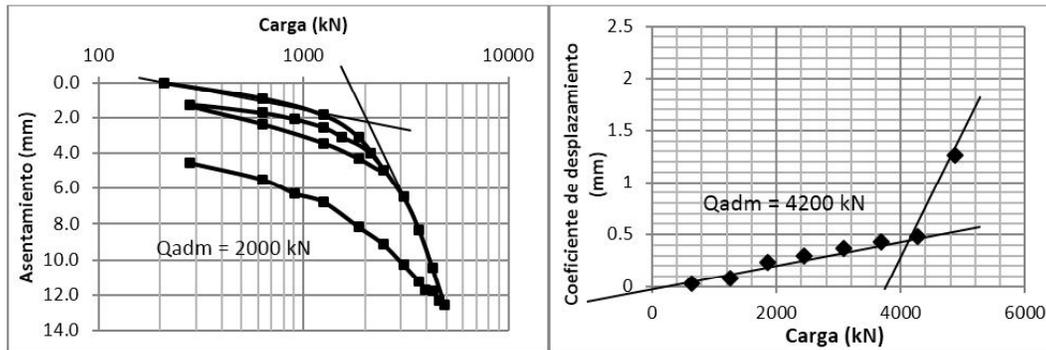
**Figura 14.** Métodos semi-empíricos (AP, AK)

**4.3. Pilote que trabaja por punta**

Este último elemento de fundación “MPA” presenta unas características geotécnicas particulares, ya que su mecanismo de trabajo es desarrollado por la resistencia producida en la base del pilote, en la cual se encuentra localizada una roca caliza meteorizada de buena resistencia. Cabe aclarar que, al igual que todos los elementos estudiados, los parámetros geotécnicos junto a los perfiles que caracterizan estos materiales se encuentran documentados en Barreto (2011).

**4.3.1. Capacidad de carga admisible según ensayo de carga**

Al observar la curva carga vs asentamiento, es posible notar que tanto el tramo inicial del primer y segundo ciclo de carga tienen un comportamiento similar, reflejando que no hubo cambios en las condiciones estructurales del suelo (Figura 15).



**Figura 15.** Curva de carga vs asentamiento y metodología de Van der Veen en pilote MPA

Al aplicar el método de los coeficientes de desplazamiento, se observa una sola variación en el comportamiento a partir de 4200 kN. Sin embargo, la pequeña magnitud de los desplazamientos permite suponer que se debieron aplicar mayores cargas para alcanzar el comportamiento plástico. Al analizar conjuntamente las curvas de la figura anterior, parece ser que el valor de 2000 kN obtenido del análisis de la gráfica log carga vs asentamiento puede considerarse como la carga a la cual se inicia la movilización en el

rango elástico, y la plastificación se produciría para una carga mayor, valor presumiblemente y cercano a los 4200 kN, (valor obtenido al aplicar el método de los coeficientes de desplazamiento).

**4.3.2. Evaluación comparativa por métodos teóricos vs ensayo de carga**

Los valores teóricos de capacidad fueron obtenidos a partir de la estimación de parámetros por medio de

los resultados de los ensayos de penetración estándar y de ensayos de laboratorio, por ende se emplearon metodologías distintas.

Al analizar el diagrama presentado (Figura 16) es

posible detectar la incertidumbre en las metodologías teóricas con relación a las capacidades sobre materiales rígidos (roca), ya que arrojan los valores más conservadores en comparación a los demás elementos evaluados.

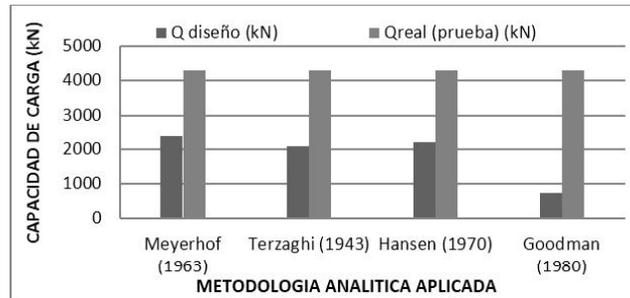


Figura 16. Capacidad teórica: MPA

En cuanto a la evaluación comparativa por metodologías semi-empíricas, para este elemento no fue posible ya que el tipo de suelo presente en la fundación (roca) no era compatible con las ecuaciones que las rigen. Estos métodos son basados en correlaciones empíricas con resultados de ensayos *in situ* y ajustados con pruebas de carga aplicados sobre suelos puramente arcillosos u/o arenosos (Pousada e Carreiro, 2004; Cintra e Aoki, 2010).

## 5. REFLEXIONES FINALES

Es necesario ajustar los métodos de cálculo de capacidad de carga para las condiciones particulares de los suelos de la geografía colombiana, como también de acuerdo con el método constructivo, ya que en el diseño se aplican formulaciones desarrolladas para condiciones geotécnicas ideales, que pueden apartarse de las condiciones particulares de formación de los suelos de cada región.

El método más ajustado a los estimativos de diseño es el formulado por Vesic (1975) para el cálculo de capacidad por punta y el de la “Fórmula general (No conservadora)

+ el método  $\alpha$ ”, para el cálculo de capacidad friccional en la mayoría de los elementos de fundación, cuya capacidad total es la suma de ambas entidades. En cuanto a las combinaciones realizadas en elementos cuyo mecanismo de trabajo es regido por la resistencia a lo largo del fuste, la metodología “ $\beta + \alpha$ ” resulta ser las más próxima a las condiciones de diseño; sin embargo, el cálculo teórico debe ser compatible con la condición de construcción (pilote hincado o pilote vaciado “*in situ*”).

En la mayoría de los pilotes evaluados se encontró que la metodología No 5 que incluye al método  $\lambda$  en el cálculo de capacidad friccional, resultó tener la magnitud más cercana a los resultados obtenidos con las pruebas de carga; sin embargo, éste método no es aplicable para pilotes de concreto hincados; no obstante, se realizó el ejercicio de determinar los valores de  $\lambda$  con el fin de compararlos con los propuestos para pilotes metálicos. Se comprobó que los valores de dicho coeficiente tienen magnitud mayor, lo que es consecuente dada la diferencia notable entre las rugosidades superficiales del concreto y el acero. (Figura 17).

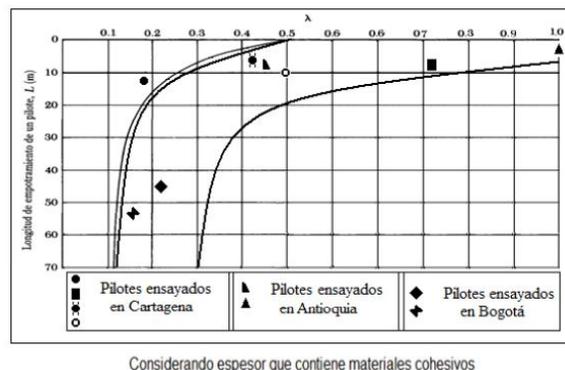


Figura 17. Valores de  $\lambda$  para los elementos hincados evaluados

El análisis del comportamiento de las pruebas de carga permitió reconocer las diferencias en los mecanismos de falla entre pilotes cuya capacidad de carga depende sólo de la fricción lateral y los que combinan los aportes por punta y fricción. Es posible pensar entonces que los valores de los factores de seguridad sean diferentes dependiendo del mecanismo de trabajo.

En el análisis conjunto de los resultados de las pruebas de carga cabe destacar las interpretaciones realizadas por el método de los coeficientes de desplazamiento y por los gráficos de carga vs asentamiento en escala semi-logarítmica, ya que permitieron interpretar el comportamiento de punta y fuste durante el estado elástico y plástico, además de complementar y corroborar la información que no era posible identificar fácilmente en la curva resultante de la prueba de carga.

Las metodologías semi-empíricas propuestas para Brasil aplicadas para los suelos colombianos, arrojaron comportamientos irregulares y nada consistentes, que advierten sobre la limitación de su aplicación a nivel regional.

Desafortunadamente por la incompleta o poca información suministrada, la cantidad de pilotes estudiados no fue suficiente para un análisis estadístico más profundo, sin embargo, es importante anotar la necesidad que se tiene de estudiar y desarrollar una experiencia regional, para así obtener diseños más precisos y apropiados a cada región, dependiendo de las características del subsuelo local. Por lo tanto, se recomienda realizar estudios posteriores que sustenten factores propios de carga y conlleven a diseños que reflejen las condiciones locales.

## AGRADECIMIENTOS

A las diferentes empresas que suministraron la información para la realización del trabajo, a la Universidad Nacional por avalar y apoyar la presente investigación, y finalmente a Colciencias a través del programa “Jóvenes Investigadores e Innovadores, Virginia Gutiérrez de Pineda” de 2010.

## REFERENCIAS

Aoki, N. e Velloso D. A., 1975. Un método aproximado para estimativa da capacidade de carga de estacas. Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol 1. 377. Argentina. 386p.

ASTM. D 1143/D 1143M – 07; Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load. 15 p.

Barreto, A., 2011. Evaluación comparativa de la capacidad de carga en cimentaciones profundas. Formulas analíticas y ensayos de carga. Tesis de Maestría en Ingeniería' Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín. 246p.

Bowles, J., 1997. Foundation Analysis and Design. McGraw Hill, Singapore.

Camapum de Carvalho, J., 2004. Memorias. Curso de suelos residuales tropicales. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

Camapum de Carvalho, J., Medeiros, C., De Aquino, F.R., Andrade, L., Bezerra, N.M., Rocha, P.J., 2009. Análises dos Resultados de Provas de Carga Estáticas sobre Fundações Profundas. Universidade de Brasília. Brasília-DF, Brasil.

Cintra, J.C. & Aoki, N., 2010. Fundações por estacas. Pojeito geotécnico. São Paulo: Oficina de Textos.

Das, B. J; 2006. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. 5ª edición. California State: Internacional Thomson Editores.

Fontana, A. P., 2000. Análise de provas de carga estática em estacas pre-moldadas cravadas na cidade Curitiba e Região Metropolitana. Dissertação de mestrado em Geotecnia. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

González A. J., 1999. Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT. X Jornadas Geotécnicas De La Ingeniería Colombiana, Bogotá.

Ibáñez, L.O., 2007. Monografía sobre el análisis de las cimentaciones sobre pilotes. Universidad Central de las Villas, Cuba.

Londoño, J., 2001. Aporte a los sistemas de pilotes, nuevos métodos de análisis y evaluación de aspectos constructivos. Trabajo dirigido de grado, Universidad nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín.

Pousada, E., Carreiro, M., 2004. Retrospectiva e técnicas modernas de fundações em estacas. Edição Associação Brasileira de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, Brasil.

Poulos, H.G & Davis, E.H., 1980. Pile Foundations Analysis and Design. John Wiley and Sons, New York. 397p.

Valencia, Y., Lara, L., Camapum De Carvalho, J., Medeiros, C., 2008. Contribución al análisis de resultados de pruebas de carga estáticas. XII Congreso Colombiano de Geotecnia. I simposio suramericano de excavaciones en roca, Bogotá.

Van der Veen, C., 1953. The bearing capacity of a pile. 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, vol. 2, pp. 84-90.

Velloso, D. A., López, F. R., 2002. Fundações Profundas. Vol 2: Coppe-Ufrj. Rio de Janeiro.

Vianna, A.P.F. & Cintra, J. C. A., 2000. Aplicabilidade do método de Van der Veen para extrapolação de curvas carga x recalque, 4º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo.

