

Análisis comparativo de capacidad portante y asentamientos de pilotes a partir de ecuaciones semi-empíricas, modelos numéricos y ensayos CPTU

Comparison of bearing capacity and settlement analysis of piles from semi-empirical equations, numerical models and CPTU tests

Edgar Eduardo Rodríguez Granados*
Miguel Ángel Sánchez Salinas **

Resumen

Este documento contiene la comparación de la capacidad de carga última y asentamientos inmediatos en pilotes para un método semi-empírico, el Método de los Elementos Finitos y un método directo a partir de los resultados del ensayo de CPTU. Para los análisis se utilizó información de campo y laboratorio de un perfil compuesto por arenas y arcillas de 60 m de profundidad.

Los resultados muestran un rango de variación amplio de capacidad de carga última entre métodos proporcional al diámetro de pilotes. Para el caso de los asentamientos en arena también el rango también es amplio, sin embargo para arcillas son muy similares en los tres métodos.

Palabras Clave: pilotes, capacidad de carga, asentamientos.

Abstract

This document contains the comparison of ultimate load capacity and immediate settlements in piles for a semi-empirical method, finite element method and a direct method from test results of CPTU. Field and laboratory information was used for the analysis in a profile consists of sands and clays of 60 meter depth. The results show a wide variation range of ultimate load capacity between methods proportional to the diameter of piles. In the case of settlements in sand, the range is too wide. However, for clays are very similar in all three methods.

Keywords: piles, load capacity, settlements.

* Ingeniero Civil, M.Sc. Geotecnia - U. Nacional de Colombia, Esp. Ing. Sísmica y Dinámica Estructural - U. Politécnica de Cataluña, Profesor Asistente de la U. Nacional de Colombia y Escuela Colombiana de Ingeniería, Gerente de Ingeniería y Georiesgos IGR SAS.

** Ingeniero Civil U. Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Estudiante Maestría Geotecnia UPTC, Jefe de Proyectos e Ingeniero Geotecnista de Ingeniería y Georiesgos IGR SAS.

I. INTRODUCCIÓN

Para el análisis de la capacidad portante o capacidad de carga de pilotes hincados o pre-excavados existen métodos diversos con bases teóricas y experimentales variadas, estos métodos están catalogados como métodos estáticos, métodos dinámicos y mediante pruebas de carga. Los métodos estáticos clasificados como métodos pseudo- teóricos o semi-empíricas y métodos empíricos, Robertson y Cabal (2010) [1].

Dentro de los métodos pseudo-teóricos se han desarrollado técnicas para el cálculo de la capacidad de carga por punta (Q_p) y de capacidad de carga del fuste o por fricción lateral (Q_s). En Das (1999) [2] se describen métodos para Q_p como Meyerhof (1976), Vecic (1977), Janbu (1976), Coyle y Castello (1981) y para Q_s los métodos de Lamda (λ), Beta (β) y Alfa (α) para arcillas y el propuesto por Meyerhof (1961) para Arenas.

Los métodos empíricos están basados principalmente en correlaciones desarrolladas a partir de ensayos de campo como el SPT y CPTU básicamente. Fellenius (2011) [3], describe el método sugerido por Meyerhof (1976) a partir del ensayo de penetración estándar; adicionalmente detalla siete métodos directos para evaluación de la capacidad axial de carga en pilotes a partir del ensayo de CPT o CPTU según cada método, Estos son:

1. Schmertmann (1978 y Nottingham (1975)
2. DRuiter y Beringen (1979), llamado método Holandés o Europeo.
3. Bustamante y Gienselli (1982), llamado método LCPC o Francés.
4. Meyerhof (1951,1963 y 1976), método para arenas.
5. Tumay y Fakhroo (1981), método para arcillas blandas.
6. El método ICP (Imperial College method), Jardine et al. (2005).
7. Eslami y Fellenius (2000).

Adicionalmente con el desarrollo de los métodos numéricos en geotecnia se ha tomado provecho del método de los elementos finitos y de diferencias finitas para la evaluación de capacidad de carga en

pilotes, estos permiten el análisis de modelos en diferentes condiciones de interacción entre el comportamiento del suelo y el pilote. Paulos and Davis (1980) [4] presenta un breve resumen de investigaciones con el método de los elementos finitos y destaca su capacidad y eficiencia para la predicción del comportamiento de pilotes en términos de carga vs desplazamiento. Actualmente programas como Plaxis de Elementos Finitos [5] y FLAC3D de Diferencias Finitas [6] y muchos otros programas permiten analizar de una forma versátil la interacción suelo-pilotes.

En este documento se hace una comparación de la capacidad de carga axial para pilotes de longitud y diámetros variables en un perfil de suelo estratificado típico del sector de Boca Grande en Cartagena Colombia de 60 m de profundidad, compuesto por capas de arenas y arcillas de compacidad y consistencia variables.

Inicialmente se describe la exploración realizada y la caracterización geotécnica del sitio, Luego se presentan los análisis de la capacidad de carga axial de los pilotes por un método semi-empírico, un método numérico (Elementos Finitos) y uno de los métodos directos del ensayo de CPTU y se presentan los resultados de los asentamientos inmediatos para la carga axial última obtenida en cada método.

Finalmente se presenta una discusión de los resultados obtenidos y reflexiones sobre los mismos, con recomendaciones para la selección del valor probable de capacidad de carga axial que puede ser adoptado para diseño.

II. LOCALIZACIÓN

El área de estudio se localiza en el sector Boca grande de la ciudad de Cartagena al norte de Colombia. El área de estudio presenta topografía plana y se encuentra al nivel del mar entre las siguientes coordenadas geográficas:

N10°24'05.03'', W75°33'28.85''
N10°24'07.22'', W75°33'26.67''
N10°24'06.31'', W75°33'25.7''
N10°24'04.03'', W75°33'27.99''

En la Figura 1 se presenta la localización general del sitio de estudio y en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** un detalle.

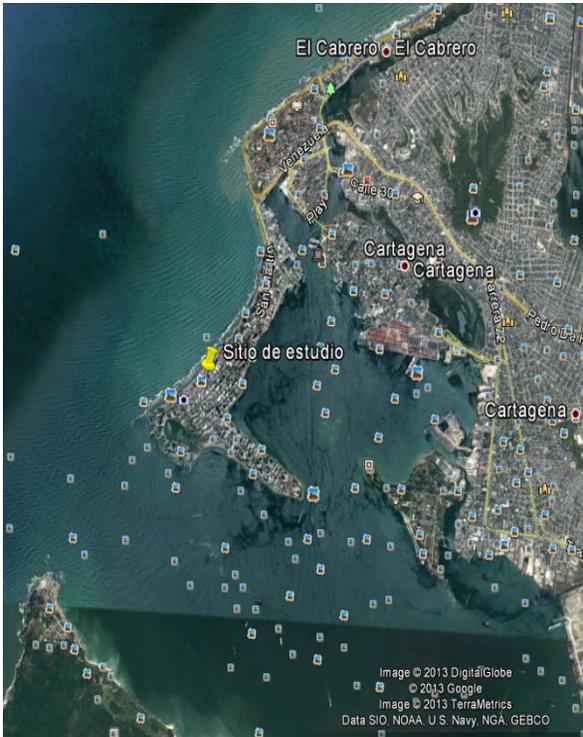


Figura 1. Localización general del estudio
Fuente: Google earth-2013



Figura 2. Detalle del área de estudio.
Fuente: Google earth-2013

III. ASPECTOS GEOLÓGICOS

De acuerdo con el Atlas Geológico de Colombia [4] el sitio de estudio se encuentra sobre depósitos del cuaternario medianamente consolidados, caracterizados como Q2-m, los cuales corresponden con una acumulación de gravas, arenas de playa y lodos con contenido de materia

orgánica asociadas a la presencia de manglares, Figura 3.



Figura 3. Geología regional del sitio de estudio
Fuente: INGEOMINAS, Atlas geológico de Colombia, 2007.

IV. EXPLORACIÓN DE CAMPO Y ENSAYOS DE LABORATORIO.

Se utilizó la información suministrada por la empresa Ingeniería y Georriesgos, IGR SAS, consistente en un sondeo mediante el ensayo de CPTU hasta 43.5 m y una perforación convencional realizada hasta 60 m con toma de muestras y ensayos de SPT. En laboratorio se realizaron ensayos de clasificación, resistencia y deformabilidad.

V. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.

Se utilizaron los resultados de laboratorio, de los ensayos SPT y CPTU, A continuación se describen los resultados de las propiedades geotécnicas.

A. Resultados exploración convencional

El contenido de humedad se encuentra entre el 10% y 55% con un promedio de 30%, los menores valores se encuentran en los primeros 28 m coincidiendo con el estrato de arena fina limosa y los mayores con el estrato de arcilla, Figura 4.

Para los estratos de arcilla el límite líquido varía entre el 45 y 80% con un promedio de 66%, y el límite plástico entre el 20% y 35% con un promedio de 28%. Este material se clasifica como una arcilla de alta plasticidad (CH).

Entre 0 y 30 m el contenido de arena es del 75% promedio y de 30 a 60 m el contenido de finos es mayor al 95% en promedio. Figura 5.

El peso unitario presenta una variación de 17,2 KN/m³ y 21KN/m³ con un valor promedio de 18.9 KN/m³. Mediante el ensayo CPTU se obtuvo valores de pesos unitarios entre 16.7 y 18.9 KN/m³ con un promedio de 18.0 KN/m³.

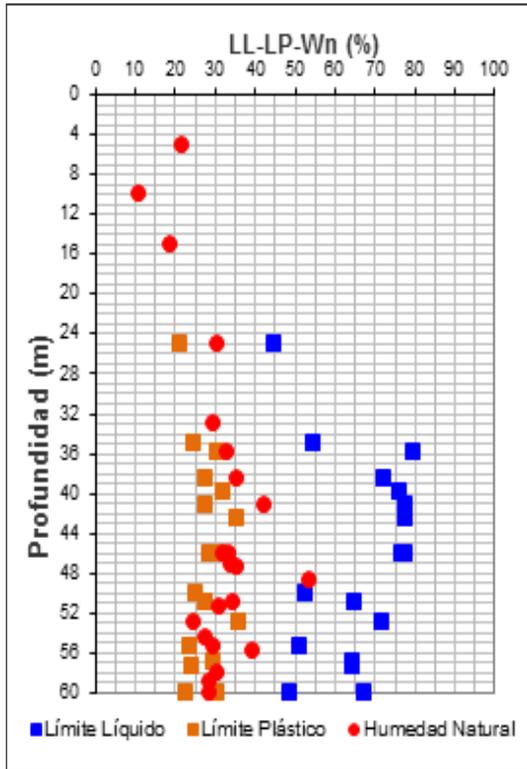


Figura 4. Variación de Humedad y límites con la profundidad.
Fuente: IGR SAS, 2013

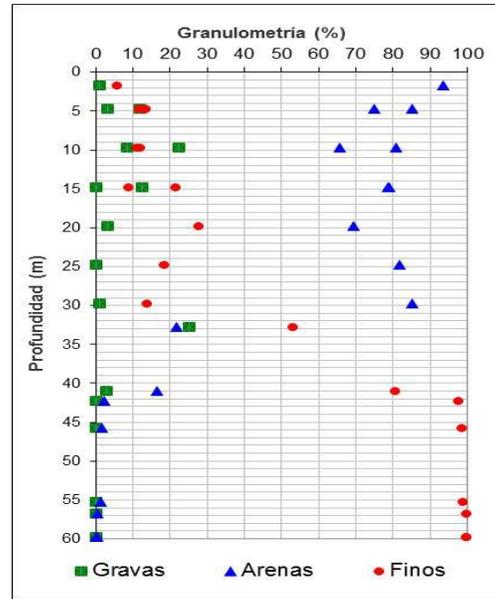


Figura 5. Granulometría del perfil.
Fuente: IGR SAS, 2013

Con base en los resultados del número de golpes de campo (N_{campo}) se presenta el siguiente comportamiento:

0 a 30 m el valor de N varía desde 13 a 28 golpes/pie con promedio de 20 golpes/pie, De 30 hasta 60 m hay una variación lineal de 13 a 65 golpes/pie, Figura 6.

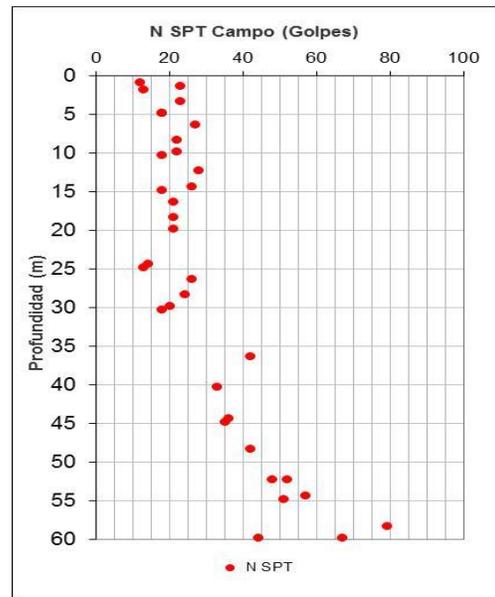


Figura 6. Variación de N_{campo} de SPT.
Fuente: IGR SAS, 2013

A partir de los datos de SPT y compresión simple se determinaron parámetros de resistencia, ángulo de fricción para arenas y cohesión no drenada para arcillas. Se utilizaron las siguientes correlaciones con N_{spt} :

$$f = 15 + (20 * N_{cor})^{0.5} \text{ Kishida} \quad (1)$$

$$C_u = 44 * N_{campo} \text{ (Ton/m}^2\text{) Stroud-1974} \quad (2)$$

En la Figura 7 se aprecia para el nivel de arena que entre 0 y 15 m el ángulo de fricción entre 32° y 41° con un promedio de 37° , entre 15 y 30 m varía entre 27° y 35° con promedio de 31° . Para el nivel de arcilla entre 30 y 45 m valores de C_u entre 5 y 18 Ton/m^2 y entre 45 y 60 m C_u varía entre 12 y 35 ton/m^2 .

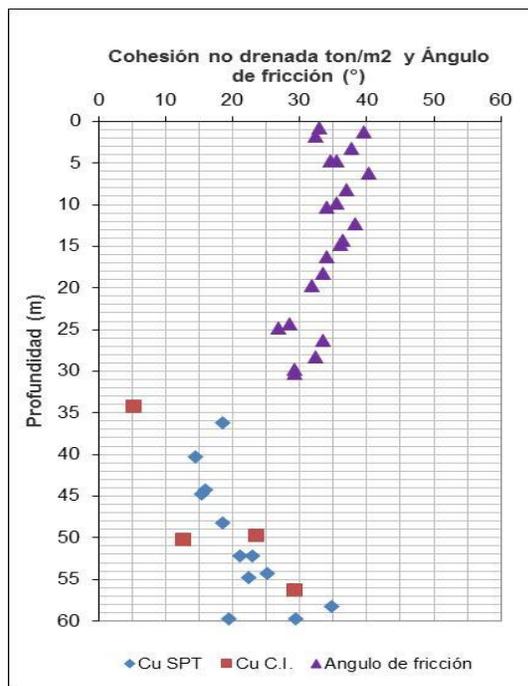


Figura 7. Ángulo de fricción y C_u vs profundidad.
Fuente: IGR SAS, 2013

B. Resultados ensayo de penetración con cono (CPTU)

Este ensayo es ampliamente utilizado en la identificación de perfiles estratigráficos, a partir de los datos de la resistencia de la punta del cono (q_t), de la resistencia a la fricción (f_s) y de la relación de fricción ($R_f = f_s/q_t$). Así mismo estos resultados se puede permiten identificar con buena precisión el tipo de comportamiento del suelo (SBT)

En la actualidad las gráficas de caracterización de comportamiento de tipo de suelo, del ensayo CPT, que se utilizan ampliamente son las propuestas por Robertson et al. 1986 presentadas en Robertson y Cabal 2010 [1]. Los resultados que se muestran a continuación corresponden con el sondeo realizado a 43.5 m. la información del ensayo se procesó con el programa CPeT-IT v 1.7.6.3, que permite tanto la representación gráfica del ensayo como el cálculo de los parámetros geotécnicos.

En la Figura 8 se muestran los resultados del ensayo de CPTu correspondientes con la resistencia (q_t), relación de fricción (R_f %), presión de poros (u_2) e índice de comportamiento del suelo I (SBT).

En esta gráfica se aprecia entre 0 y 17 m un comportamiento homogéneo para la relación de fricción y la presión de poros hidrostática indica de una capa compuesta por arena, entre 9 y 11 m los valores de q_t indican una capa de arena muy densa.

Entre 17 y 32 m se ve un comportamiento heterogéneo en los tres parámetros de referencia, indicando la presencia de capas gruesas de arena intercaladas con capas delgadas de arcilla y limo que generan incrementos en la presión de poros.

Entre 32 y 36 m se encuentra una capa con valores bajos pero uniformes de q_t , y un incremento importante en la presión de poros con respecto a la hidrostática indicando un nivel de suelo fino, que clasifica entre limo arenoso y arcilla limosa.

Finalmente, entre 36 y 43.5 m se aprecia un incremento en q_t , R_f y u con una tasa de aumento relativamente constante indicando igualmente la presencia de suelos finos tipo arcilla limosa y limo arenoso.

Los resultados obtenidos en el CPTU presentan buena concordancia con la exploración convencional.

A partir de correlaciones desarrolladas con el ensayo de CPTU, es posible evaluar parámetros como peso unitario, módulo de elasticidad, módulo confinado, ángulo de fricción para arenas, resistencia al corte no drenada para arcillas, relación de sobre-consolidación entre otros

parámetros. Tales correlaciones pueden ser consultadas en Robertson y Cabal 2010 [1], con base en el índice comportamiento SBT (Ic) y la ayuda del software se determinaron capas homogéneas del suelo y sus correspondientes parámetros promedio. Figura 9.

VI. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEFINITIVOS

Finalmente con todos los resultados se asignaron los parámetros geotécnicos para la aplicación de los métodos pseudo-teórico y de elementos finitos. Para todos los casos se tomó el nivel de agua freática a 1.6 m de profundidad con respecto a la superficie actual.

Tabla 1. Parámetros geotécnicos finales

PROF INI (m)	PROF FIN (m)	Descripción	qt MPA	Gama KN/M3	Fi (°)	Su (KPa)	Es (Mpa)	ν
0.0	9.0	Arena Gris densa	10.9	18.2	40.3		36.1	0.25
9.0	10.0	Arena Gris muy densa	41.6	17.7	45.5		85.9	0.25
10.0	15.0	Arena Gris Densa	9.232	18.3	37.8		65.6	0.25
15.0	23.0	Arena Gris Densa	6.4	18.1	36.8		81.6	0.25
23.0	24.0	Arcilla Gris Dura	2.7	17.7		108	60	0.35
24.0	30.0	Arena gris Densa	7.4	18.6	35.9		100.5	0.25
30.0	37.0	Arcilla Gris Firme	2.1	16.95		91	76.3	0.35
37.0	43.0	Arcilla Gris Muy Dura	4.6	18.8		275	137.4	0.35
43.0	50.0	Arcilla Gris Dura		19		164	82.125	0.35
50.0	60.0	Arcilla Gris Muy Dura		20		225	112.375	0.35

VII. CAPACIDAD DE CARGA AXIAL Y ASENTAMIENTOS

Para la comparación de la capacidad carga axial se utilizó el método de Janbu (1976), el método de los Elementos finitos y el método de LCPC a partir del CPTU. La ecuación general de capacidad de carga axial es:

$$Q_u = Q_s + Q_p = \sum f_i \cdot p \cdot \Delta L_i + q_p \cdot A_p \quad (3)$$

En arcillas con el método alfa:

$$Q_s = \sum \alpha \cdot c_u \cdot p \cdot \Delta L_i \quad (4); \quad \alpha = 0.21 + 0.25 \left(\frac{p_a}{c_u} \right) \quad (5)$$

En arenas:

$$Q_s = \sum (1 - \sin \phi) \sigma'_v \cdot \tan \delta \cdot p \cdot \Delta L_i \quad (6)$$

Janbu (1976) expresa la capacidad por punta Q_p con siguiente ecuación:

$$Q_p = A_p (c' N_c^* + q' N_q^*) \quad (7)$$

$$N_q^* = \left(\tan \phi + \sqrt{1 + \tan^2 \phi} \right)^2 \exp(2\psi \tan \phi)$$

$$N_c^* = \left(N_q^* - 1 \right) \cot \phi \quad (8)$$

- f_i : Resistencia cortante unitaria ultima en el estrato i
- p : Perímetro del pilote ($\pi \cdot D_p$)
- Q_p : Resistencia de punta
- Q_s : Resistencia por fricción lateral
- Q_u : Resistencia ultima
- A_p : Área de la base ($(\pi/4) \cdot D_p^2$)
- ΔL_i : Espesor del estrato i
- C_u : Resistencia al corte no drenada
- P_a : Presión atmosférica (101.3 kN/m²)
- σ'_v : Esfuerzo vertical efectivo a cualquier nivel ΔL_i
- δ : Angulo de fricción suelo – pilote (Para este caso, $\delta = 3/4 \cdot \phi$)
- N_c^* : Factor de capacidad de carga (en función de ϕ)
- N_q^* : Factor de capacidad de carga (en función de ϕ), para $\phi=0$, $N_c^* = 5.74$
- ψ : Angulo entre 60° para arcillas y 105° para arena.

El método de los elementos finitos permite modelar el perfil geotécnico junto con la geometría del pilote y la respectiva interface y obtener la respuesta carga-asentamiento para cada geometría planteada, La aplicación del método de los elementos finitos se realizó mediante el uso del software Plaxis V8.x, el cual permite generar modelos axisimétricos de interacción suelo estructura útiles para el análisis de este tipo de cimentación [5]. Figura 10.

Para el caso los suelos se utilizó el modelo de Mohr-Coulomb, para los niveles de arcillas se trabajó en condición drenada, con la resistencia al corte no drenada. Se utilizó una interface entre el suelo y el pilote, para arenas 0.75 y para arcillas según la ecuación 5. El pilote se modeló como un material elástico con las propiedades típicas de concreto. En el modelo se tuvo en cuenta el nivel de agua freática.

El método directo del LCPC Bustamante y Gienselli (1982) utiliza los resultados directos de la resistencia del cono q_c del ensayo de penetración con cono.

La resistencia por punta:

$$q_p = K_c \cdot q_{ca} \quad (9)$$

Donde, q_{ca} es valor promedio de resistencia del cono y K_c coeficiente que depende del tipo de pilote y tipo de suelo de acuerdo con la Tabla 2.

La resistencia a la fricción:

$$f_s = q_c / a_{lpc} \quad (10)$$

q_c es el valor de resistencia por punta del cono y a_{lpc} cuyos valores corresponden con los indicados en la Figura 11.

El valor de q_{ca} corresponde con el valor promedio de q_c tomado en el rango comprendido entre 1.5D por encima y por abajo de la punta del pilote, Figura 11, este promedio determinado de la siguiente forma:

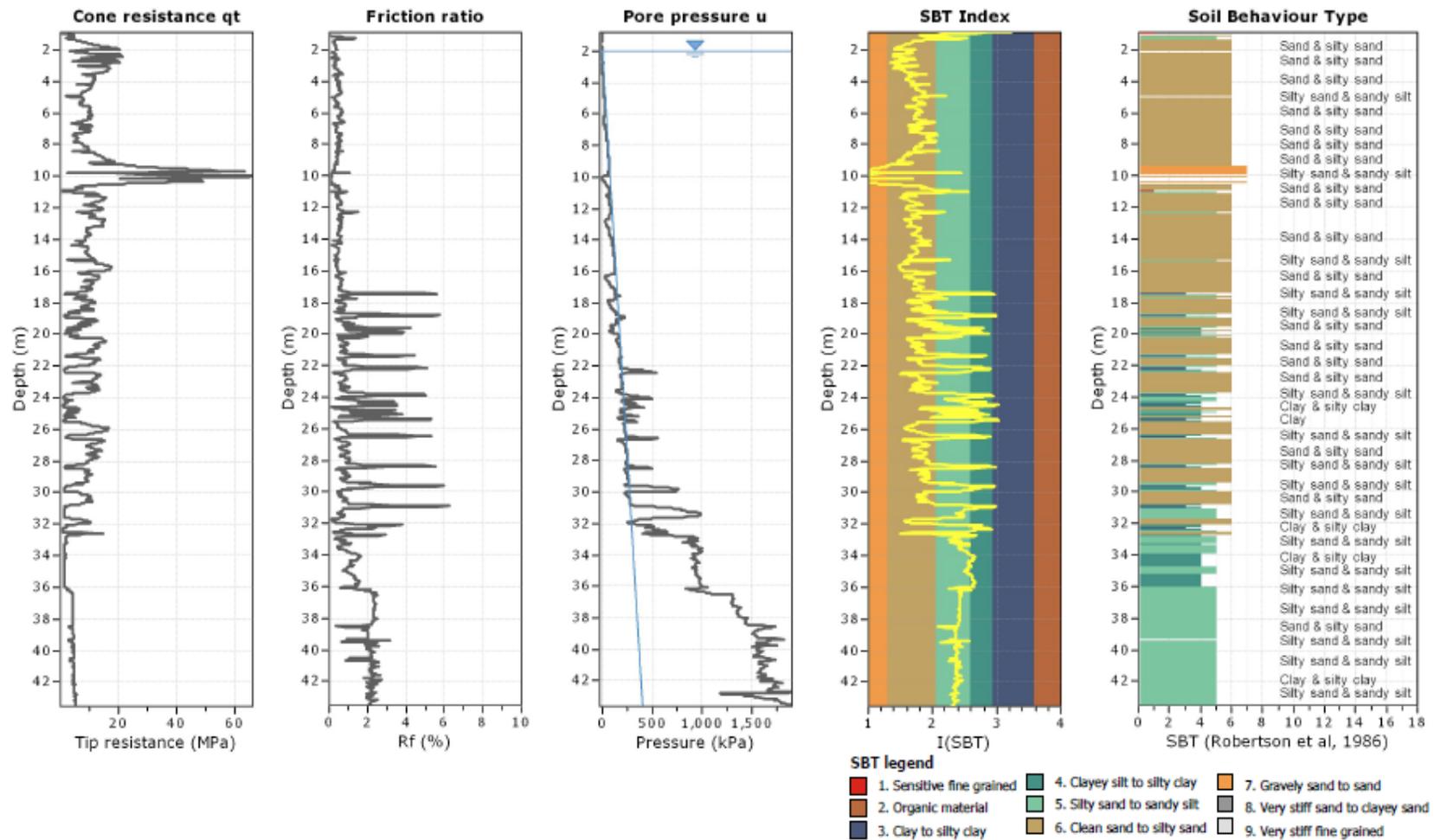


Figura 8. Resultados del ensayo de penetración con cono CPTU y clasificación del suelo (SBT)
Fuente: IGR SAS, 2013

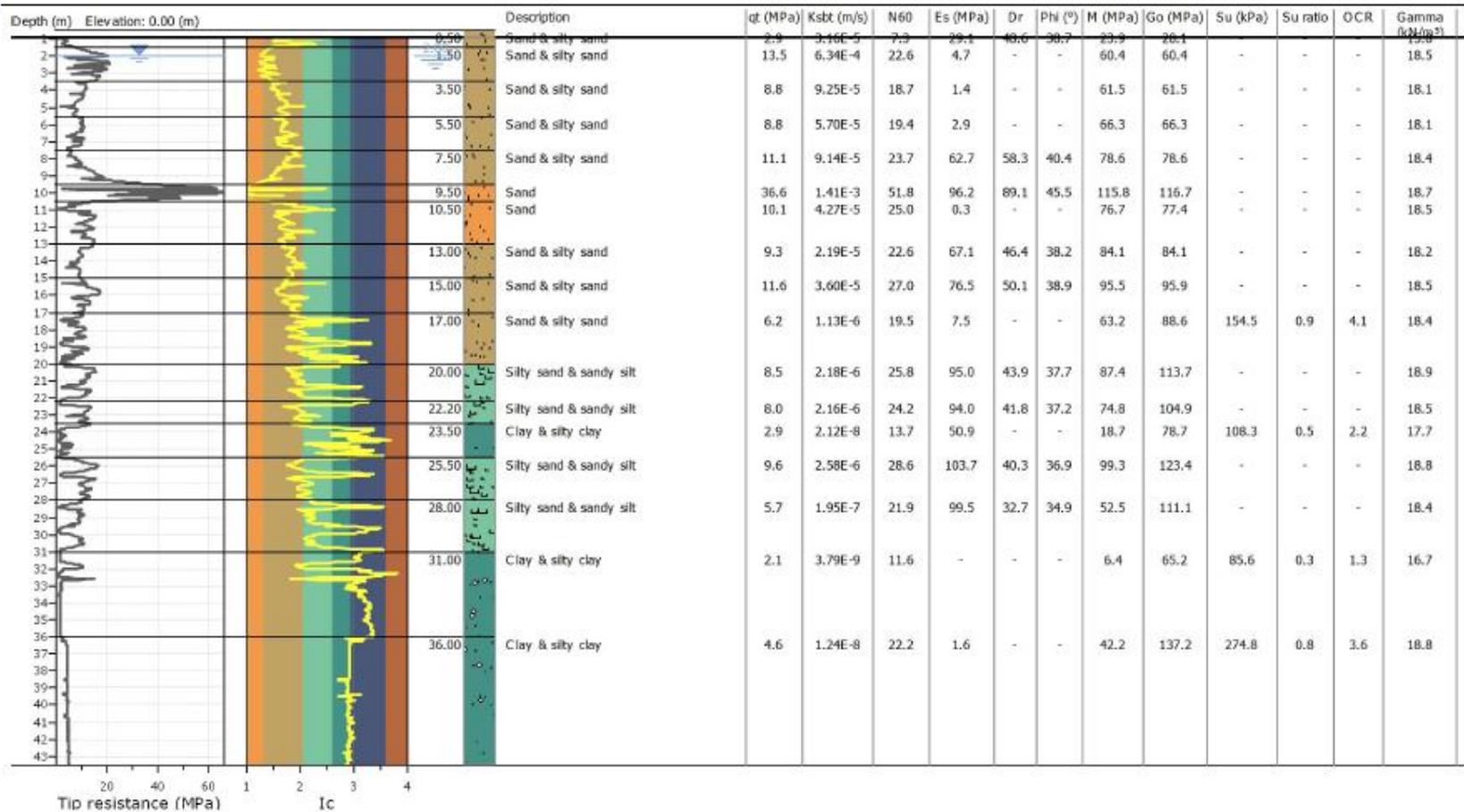


Figura 9. Sectorización y resumen de propiedades para el ensayo de CPT, Prof. =43.5 m.

- Tomar los valores de q_c entre 1.5 veces el diámetro por encima y por debajo de la punta del pilote y sacar el promedio.
- Determinar $1.3q_c$ promedio y $0.7q_c$ promedio y eliminar los valores de q_c que se encuentren por encima y por debajo los límites calculados.
- Con los valores de q_c entre $0.7q_c$ promedio y $1.3q_c$ promedio calcular un nuevo q_c promedio el cual corresponde con el q_{ca} utilizado.

Para el cálculo de capacidad portante por el método LCPC se utilizó el software CPet-IT V1.7.6.3 que permite el procesamiento del ensayo de CPT y el correspondiente análisis de capacidad portante para pilotes.

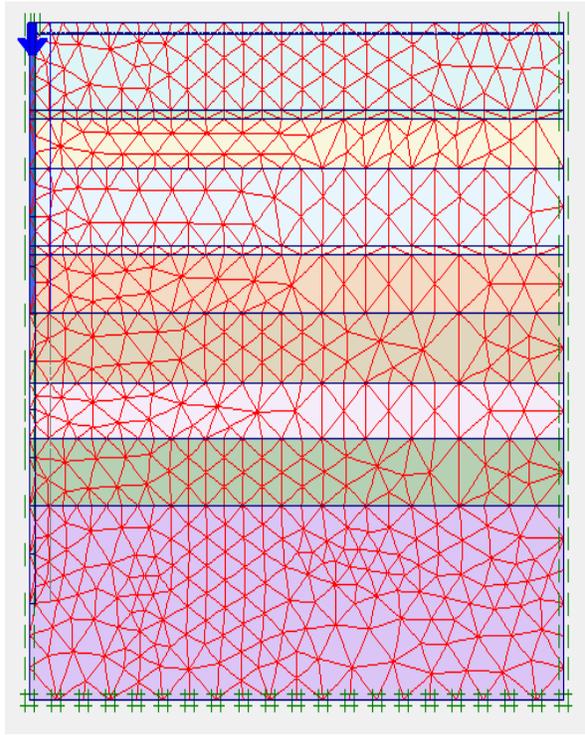


Figura 10. Modelo axisimétrico de elementos finitos
Fuente: IGR SAS 2013.

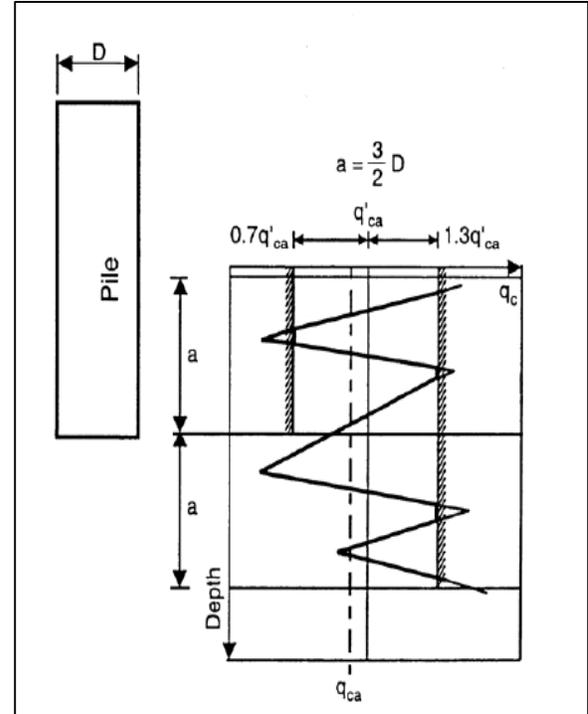


Figura 11. Cálculo del valor equivalente de q_{ca}
Fuente: ROBERTSON P.K. y CABAL K.L, Guide to Cone Penetration Testing For Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc. 4th Edition 2010.

Para el cálculo de los asentamientos inmediatos, se empleó la metodología propuesta por DAS (1999) [2], estos se componen de:

Deformación del fuste (Se_1):

$$Se_1 = \frac{(Q_{wp} + \varepsilon \cdot Q_{ws})L_p}{A_p \cdot E_p} \quad (11)$$

Deformación por carga en la punta (Se_2):

$$Se_2 = \frac{q_{wp} \cdot D}{E_s} \cdot (1 - \mu_s^2) I_{wp} \quad (12)$$

Deformación por carga transmitida a lo largo del fuste (Se_3):

$$Se_3 = \left(\frac{Q_{ws}}{p \cdot L_p} \right) \frac{D}{E_s} \cdot (1 - \mu_s^2) I_{ws} \quad (13)$$

Dónde:	q_{wp} : Carga en la punta por área unitaria en la punta del pilote (Q_{wp}/A_p)
Q_{wp} : Carga tomada en la punta del pilote bajo condición de carga de trabajo.	E_s : Módulo de elasticidad del suelo en o debajo de la punta del pilote.
Q_{ws} : Carga tomada por fricción bajo condición de carga de trabajo.	μ_s : Relación de Poisson del suelo
A_p : Área de la sección transversal del pilote.	I_{wp}, I_{ws} : Factores de influencia.
P : Perímetro del pilote ($\pi.D_s$)	El asentamiento total inmediato del pilote es:
L_p : Longitud del pilote	$S = Se_1 + Se_2 + Se_3$ (14)
E_p : Módulo de Elasticidad del material del pilote (Concreto).	Lo anterior se aplicó para el método de Janbu y para el método de LCPC.
ε : Factor que depende de la naturaleza de la distribución de la fricción unitaria a lo largo del fuste del pilote.	Para el método de elementos finitos se obtuvieron curvas de carga- asentamiento para las longitudes y diámetros de cálculo, con estas se obtuvo la carga última y el asentamiento correspondiente.
D : Ancho o diámetro del pilote	

Tabla 2. Valores de k_c utilizados para al cálculo de q_p método de LCP (Bustamante and Ganeselli, 1982)

Nature of soil	q_c (MPa)	Factors k_c	
		Group I	Group II
Soft clay and mud	< 1	0.4	0.5
Moderately compact clay	1 to 5	0.35	0.45
Silt and loose sand	≤ 5	0.4	0.5
Compact to stiff clay and compact silt	> 5	0.45	0.55
Soft chalk	≤ 5	0.2	0.3
Moderately compact sand and gravel	5 to 12	0.4	0.5
Weathered to fragmented chalk	> 5	0.2	0.4
Compact to very compact sand and gravel	> 12	0.3	0.4

Group I: plain bored piles; mud bored piles; micro piles (grouted under low pressure); cased bored piles; hollow auger bored piles; piers; barrettes.
Group II: cast screwed piles; driven precast piles; prestressed tubular piles; driven cast piles; jacked metal piles; micropiles (small diameter piles grouted under high pressure with diameter < 250 mm); driven grouted piles (low pressure grouting); driven metal piles; driven rammed piles; jacket concrete piles; high pressure grouted piles of large diameter.

Fuente: ROBERTSON P.K. y CABAL K.L, Guide to Cone Penetration Testing For Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc. 4th Edition 2010.

Tabla 3. Valores del coeficiente de fricción, α_{LCPC}

Nature of soil	q_e (MPa)	Category									
		Coefficients, α				Maximum limit of f_p (MPa)					
		I		II		I		II		III	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Soft clay and mud	< 1	30	90	90	30	0.015	0.015	0.015	0.015	0.035	
Moderately compact clay	1 to 5	40	80	40	80	0.035	0.035	0.035	0.035	0.08	≥ 0.12
						(0.08)	(0.08)	(0.08)			
Silt and loose sand	≤ 5	60	150	60	120	0.035	0.035	0.035	0.035	0.08	–
Compact to stiff clay and compact silt	> 5	60	120	60	120	0.035	0.035	0.035	0.035	0.08	≥ 0.20
						(0.08)	(0.08)	(0.08)			
Soft chalk	≤ 5	100	120	100	120	0.035	0.035	0.035	0.035	0.08	–
Moderately compact sand and gravel	5 to 12	100	200	100	200	0.08	0.035	0.08	0.08	0.12	≥ 0.20
						(0.12)	(0.08)	(0.12)			
Weathered to fragmented chalk	> 5	60	80	60	80	0.12	0.08	0.12	0.12	0.15	≥ 0.20
						(0.15)	(0.12)	(0.15)			
Compact to very compact sand and gravel	> 12	150	300	150	200	0.12	0.08	0.12	0.12	0.15	≥ 0.20
						(0.15)	(0.12)	(0.15)			

Category – IA: plain bored piles; mud bored piles; hollow auger bored piles; micropiles (grouted under low pressure); cast screwed piles; piers; barrettes. IB: cased bored piles; driven cast piles. IIA: driven precast piles; prestressed tubular piles; jacket concrete piles. IIB: driven metal piles; jacked metal piles. IIIA: driven grouted piles; driven rammed piles. IIIB: high pressure grouted piles of large diameter > 250 mm; micropiles (grouted under high pressure). Note: Maximum limit unit skin friction, f_p ; bracket values apply to careful execution and minimum disturbance of soil due to construction.

Fuente: ROBERTSON P.K. y CABAL K.L, Guide to Cone Penetration Testing For Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc. 4th Edition 2010.

VIII. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se presentan los resultados de capacidad de carga última Q_{ult} por cada método de análisis, asentamientos inmediatos, relación de Q_p/Q_{ult} y comparación de resultados.

A. Capacidad de carga axial q_{ult} y asentamientos

1) Método de Janbu

En la Figura 14 muestra la magnitud de los asentamientos inmediatos referidos a la carga última. Para el estrato de arena los valores resultan muy superiores a los que se presentan para el estrato de arcilla, básicamente por ser la capacidad por punta, la que da mayor aporte en Q_{ult} y la que genera mayor valor en la ecuación 14. Para la capa de arcilla apenas se alcanzan 5 cm siendo representativos del aporte por fricción. se aprecian las gráficas de variación de Q_{ult} con profundidad, se puede ver la caída de capacidad a partir de los 30 m por la presencia del estrato de arcilla, además la influencia negativa de las capas arcillosas dentro

del nivel de arena y cuya influencia es más significativa a mayor diámetro.

La Figura 13 muestra la relación de Q_p/Q_{ult} . Es importante ver que en el nivel de arena los valores son superiores al 80%, mientras que para el estrato de arcillas el valor es apenas del 30 % en promedio. También se notable la influencia del diámetro en esta relación y con mayor proporción para el estrato de arcilla.

La Figura 14 muestra la magnitud de los asentamientos inmediatos referidos a la carga última. Para el estrato de arena los valores resultan muy superiores a los que se presentan para el estrato de arcilla, básicamente por ser la capacidad por punta, la que da mayor aporte en Q_{ult} y la que genera mayor valor en la ecuación 14. Para la capa de arcilla apenas se alcanzan 5 cm siendo representativos del aporte por fricción.

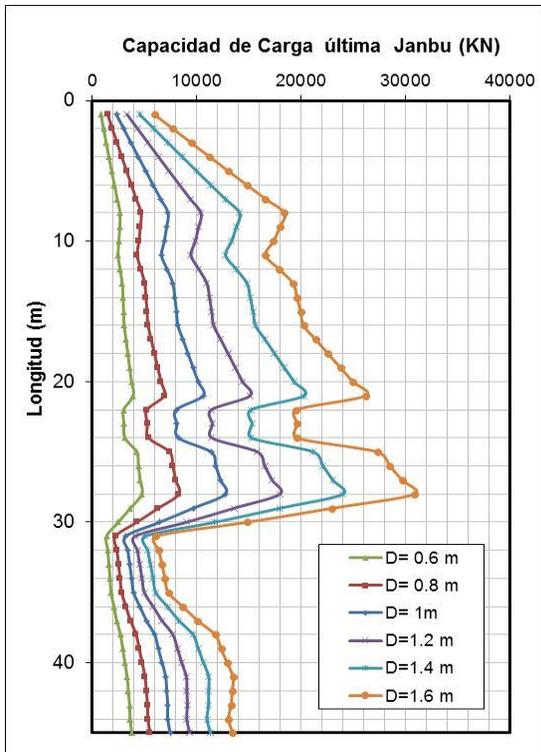


Figura 12. Gráfica de Q_{ult} Janbu

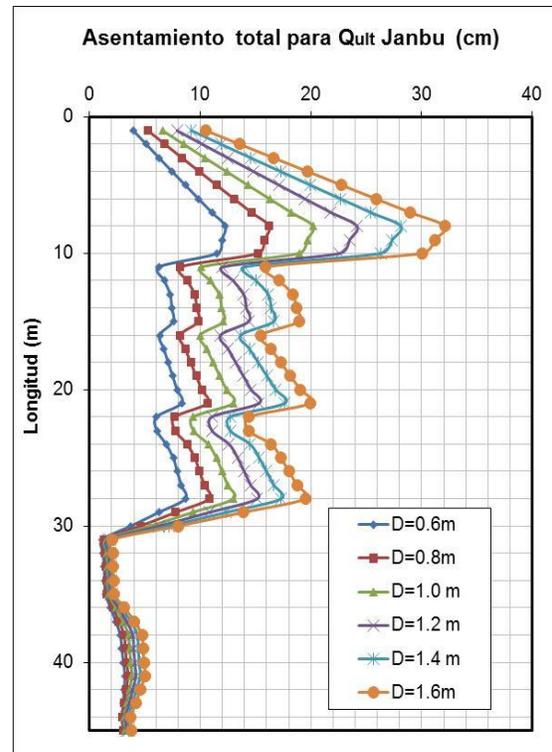


Figura 14. Asentamientos inmediatos para Q_{ult} de Janbu.

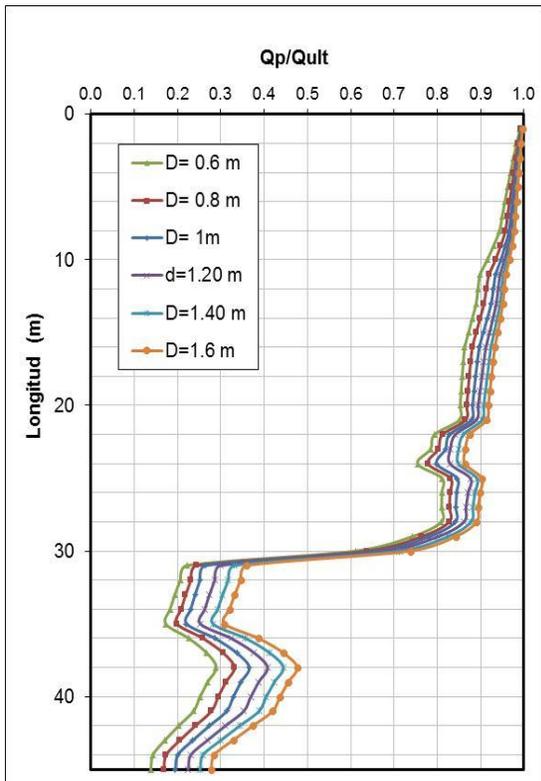


Figura 13. Gráfica de Q_p/Q_{ult} para Janbu

2) Método de los Elementos Finitos

Para determinar la carga última se generaron curvas de carga asentamiento como las mostradas en la Figura 15, para el caso de las arcillas la curva presenta un punto de inflexión claro que corresponde con la carga última y el asentamiento esperado, para el caso de las arenas se requieren valores altos de asentamiento para la falla, en este caso se tomó la carga de falla para un asentamiento de 0.15D.

La Figura 15. Gráficas de Carga Vs asentamiento, MEF.

muestra los resultados de Q_{ult} por el método de los Elementos Finitos, al igual que en Janbu a los 30 m hay una reducción sustancial de la capacidad de carga, sin embargo a 45 m se ve que Q_{ult} es superior que en el estrato de arena contrario a lo que muestra Janbu.

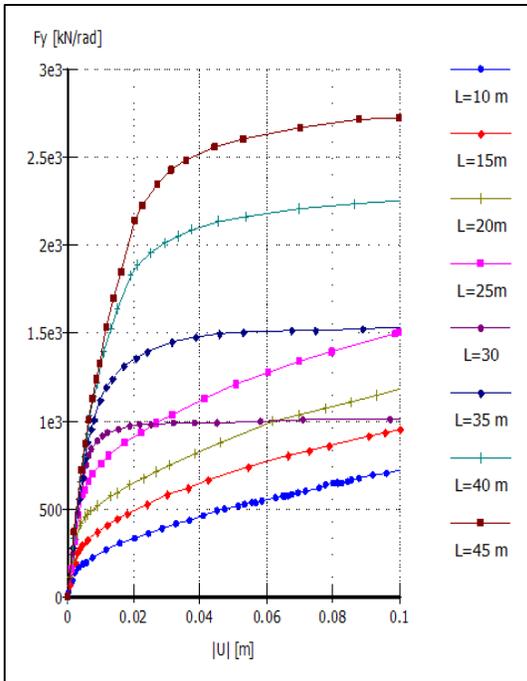


Figura 15. Gráficas de Carga Vs asentamiento, MEF.

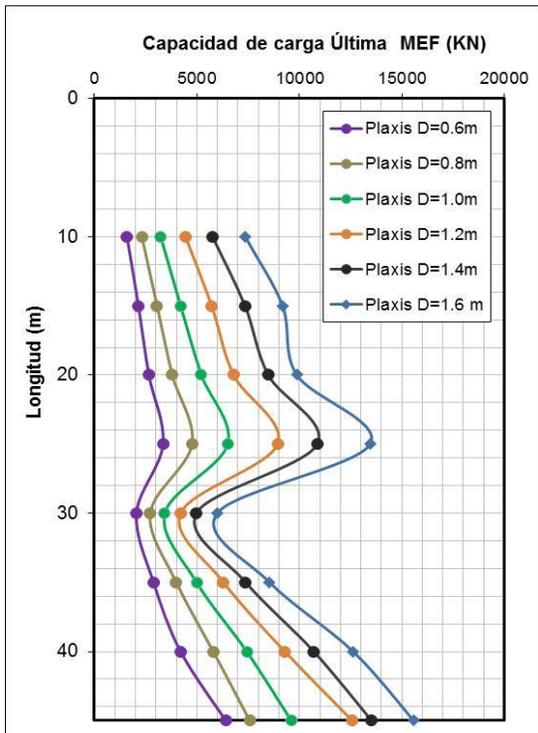


Figura 16. Gráficas de Qult, MEF.

La **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** muestra los asentamientos evaluados por el MEF, para el caso del estrato de arena los valores

son significativamente mayores que en estrato de arcilla. Adicionalmente el asentamiento para la carga de falla en el estrato de arcilla resulta prácticamente independiente del diámetro para una misma longitud.

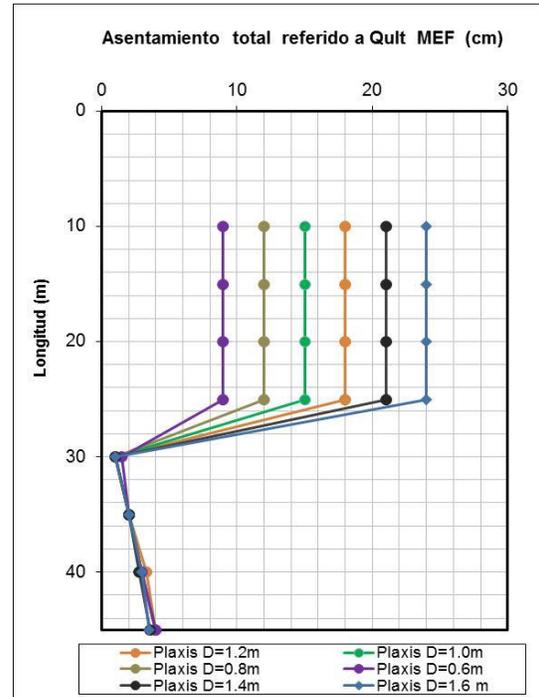


Figura 17. Gráficas asentamiento referido a Qult, MEF

3) Método de LCPC (CPTu).

La Figura 18 muestra los resultados de capacidad de carga a partir de los datos directos del ensayo CPTu, estas gráficas muestran un perfil bastante variable con la profundidad haciéndose más notable a medida que aumenta el diámetro del pilote. Esta condición se debe a la variabilidad de resistencia en las diversas capas que conforman el perfil geotécnico y que son registradas de manera detallada con el ensayo. Para el estrato de arcilla se muestra un comportamiento más homogéneo de Qult, dada la uniformidad del estrato evidenciada en el perfil de resistencia.

La Figura 18. Gráficas de Qult a partir del método LCPC.

muestra la relación Q_p/Q_{ult} , en este caso se presenta una pérdida gradual de aporte de carga por

punta pasando del 90% para pilotes muy cortos al 20% para pilotes largos en el estrato de arena y apenas el aporte es del 15% cuando los pilotes alcanzan el estrato de arcilla.

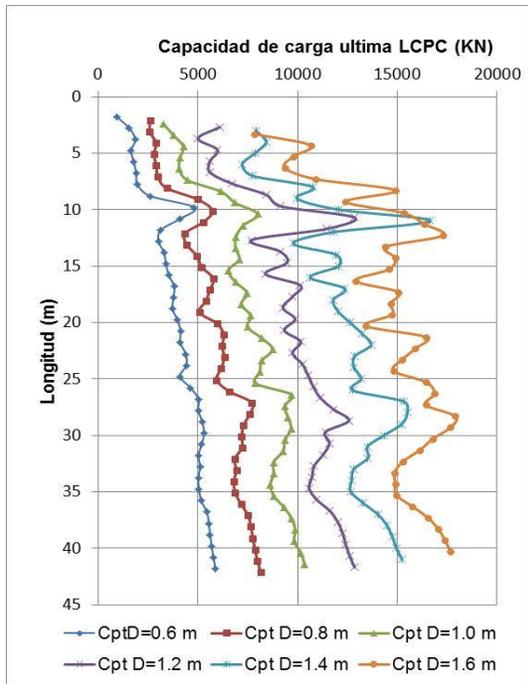


Figura 18. Gráficas de Qult a partir del método LCPC.

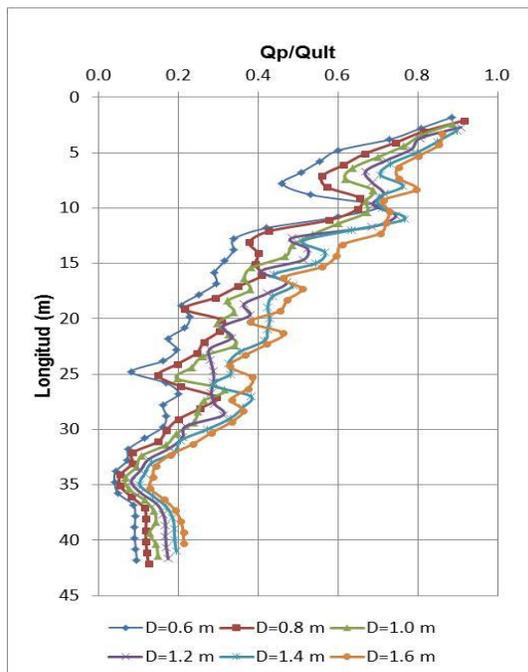


Figura 19. Gráficas Qp/Qtul, LCPC.

Los asentamientos inmediatos muestran valores promedio mayores a 10 cm para pilotes hasta de 10 m y luego se reducen a 5 cm promedio hasta 30 m, lo anterior corresponde con el mayor aporte de carga por punta pilotes cortos. Finalmente en la capa de arcilla son inferiores a 4 cm y resultan independientes del diámetro conforme los demás métodos. Figura 20.

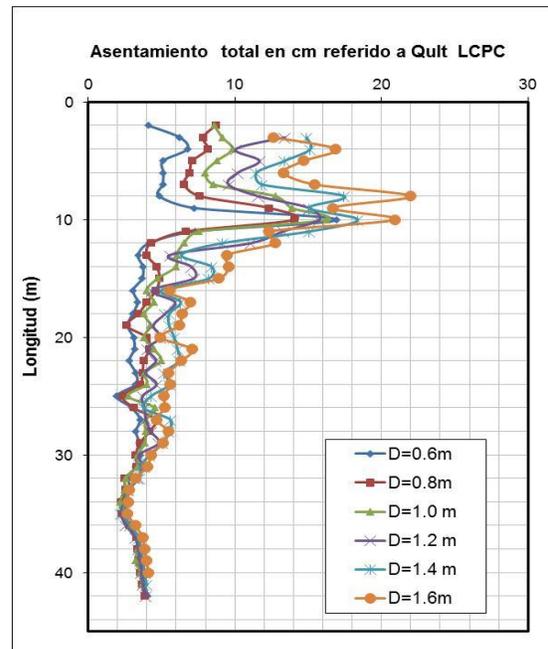


Figura 20. Gráficas asentamiento referidas a Qult, LCPC.

IX. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

La comparación se realizó en términos de carga última y asentamientos para los tres métodos tomando como referencia los pilotes de 0.6, 1.0 y 1.4 m de diámetro. Los resultados se muestran en la Figura 21 y en la Figura 21. Gráficas comparativas de resultados de capacidad de carga última Qult.

Para la capacidad de carga última se aprecia que los rangos de variación de se amplían con el aumento del diámetro, alcanzando diferencias de hasta 10000 KN (1000 ton) entre métodos.

También se puede ver que para el estrato de arena hay una correspondencia muy buena entre los métodos de Janbu y LCPC para 0.6 y se pierde al crecer el diámetro.

Adicionalmente resulta una muy buena correspondencia entre el método de Janbu y el MEF para el estrato de arcilla con poca dependencia del diámetro.

En todos los casos el MEF da menores valores de Qult para el estrato de arena y el método LCPC da los mayores valores para el estrato de arcilla.

Con respecto a los asentamientos se nota una variación bastante amplia para el estrato de arena, sin embargo para el estrato de arcillas los valores resultantes por los tres métodos puede decirse que son iguales. Además resulta que los valores mayores corresponden con el MEF y los menores con el método de LCPC, lo que indica que el

primero genera mayor aporte por punta y el segundo mayor aporte por fricción.

Con lo obtenido en este ejercicio surgen las siguientes preguntas:

¿Ante tal variación de resultados qué valor de Qult debe ser utilizado y que aporte por punta y por fricción para la estimación de los asentamientos?

¿Qué factor de seguridad aplicar al aporte por fricción en arenas, si en teoría se desarrolla en su totalidad con asentamientos muy pequeños quedando gran parte de la capacidad por punta disponible?

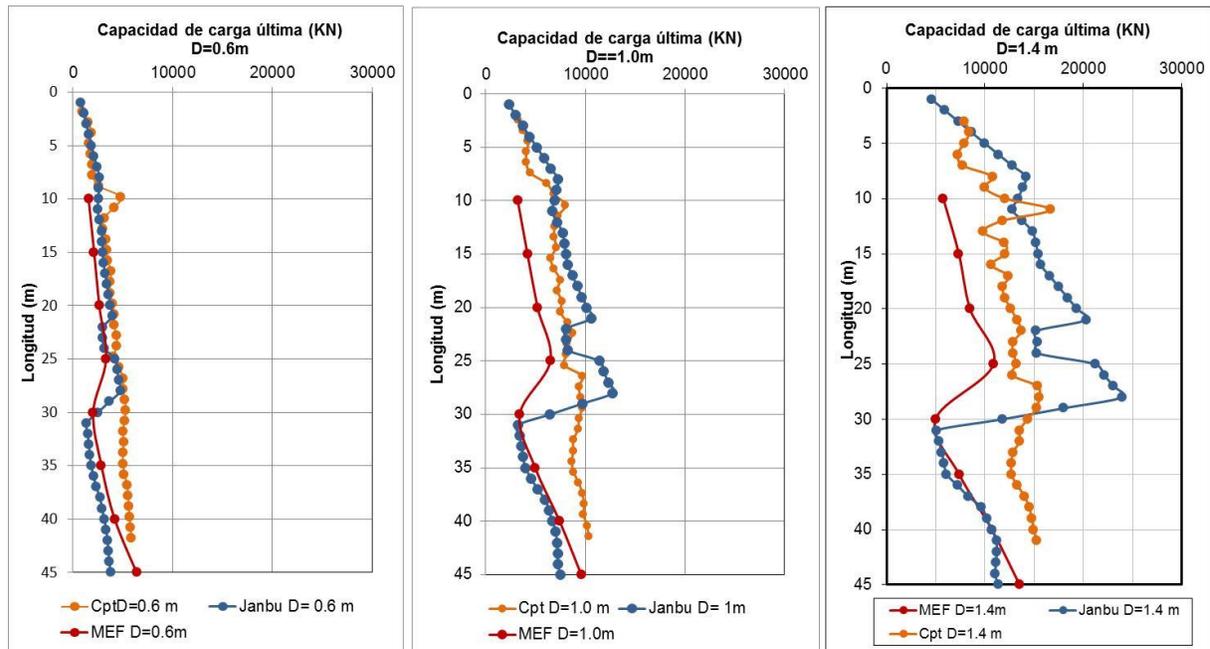


Figura 21. Gráficas comparativas de resultados de capacidad de carga última Qult.

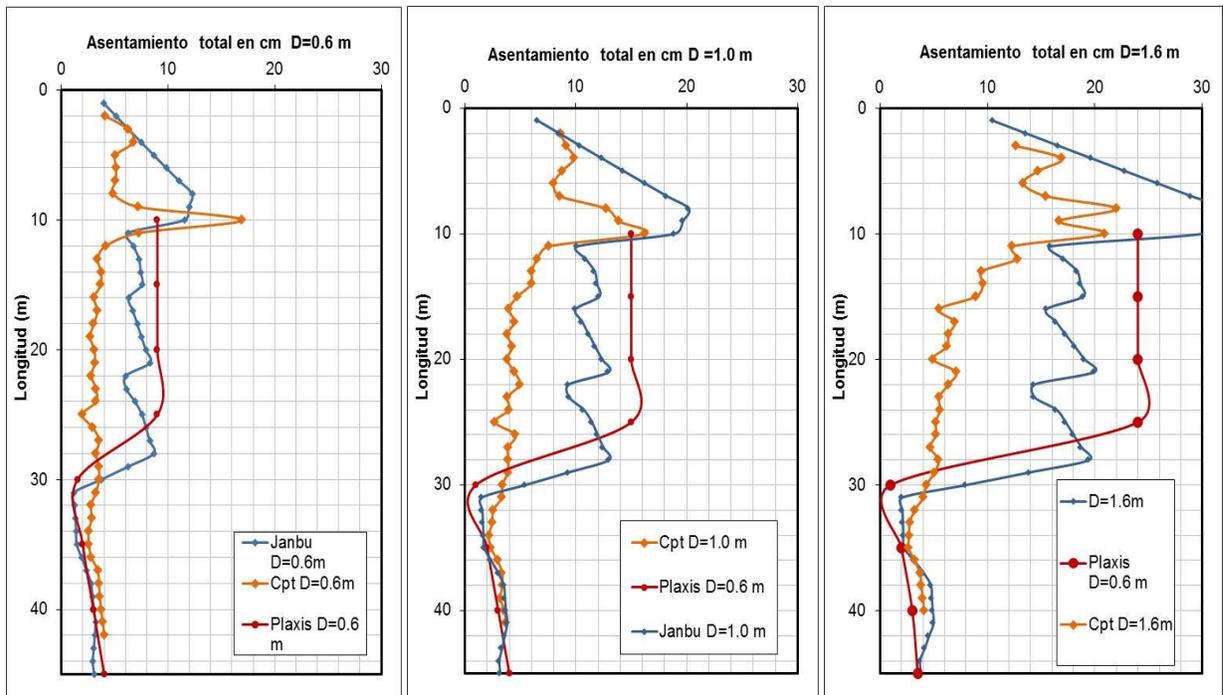


Figura 22. Gráficas comparativas de asentamiento.

X. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos por los métodos de análisis utilizados y la comparación entre ellos, podemos extraer las siguientes conclusiones.

La relación de Q_p/Q_{ult} para el método de Janbu muestra valores superiores al 80% para el estrato de arena mientras que para el método de LCPC este valor se reduce gradualmente de alrededor del 90% hasta el 25% cerca a la base del estrato. Esta condición conlleva a mayores valores asentamientos para Janbu tomando como referencia la carga última. Para el caso del MEF, el valor de carga última para arenas depende del nivel de asentamiento que se adopte para falla, en este ejercicio se tomó 0.15D y en todos casos el valor de asentamiento es superior a los otros métodos pero la carga última inferior.

Para el estrato de arcilla se tiene que la relación Q_p/Q_{ult} para Janbu puede estar entre el 20 y el 40% con una influencia importante del diámetro del pilote y para el caso de LCPC el valor resulta inferior al 20% reflejando el gran aporte por fricción que brinda el estrato de arena a la capacidad de carga. Los asentamientos resultantes

en los tres métodos de análisis para el estrato de arcilla son inferiores a los 4 cm con una mínima variación entre cada uno y se aprecia que son prácticamente independientes del diámetro.

El rango de variación de Q_{ult} entre los tres métodos de análisis se hace más amplio con el aumento del diámetro, esto dificulta la selección del valor apropiado de resistencia última de pilotes y por tanto es necesario el buen juicio ingenieril y la calidad en la información geotécnica de entrada para la ejecución de los análisis.

Se resalta la concordancia resultante entre el método de Janbu y el método de LCPC en el estrato de arena especialmente para pilotes de diámetro intermedio. Sin embargo, los asentamientos resultantes no presentan tal concordancia debido principalmente a la diferencia en el aporte por punta y fricción que cada método genera.

También se destaca la concordancia entre el método de Janbu y el MEF para el estrato de arcilla, la cual es bastante independiente del diámetro. Asimismo los valores de asentamientos tienen gran correspondencia en los tres métodos.

Aunque el método de LCPC se basa en el registro detallado de resistencia por punta del perfil

geotécnico, el proceso de construcción del pilote puede degradar las características mecánicas del suelo circundante, y la presencia de capas delgadas de arcilla puede reducir la fricción en las capas de arena por la migración de finos resultando en una pérdida de aporte por fricción lateral.

El MEF al permitir determinar la interacción suelo pilotes y conocer el comportamiento carga desplazamiento del pilote además de la aplicación de modelos constitutivos diferentes es una herramienta poderosa para el análisis de capacidad de carga en pilotes. Sin embargo, se debe garantizar la excelente calidad de los parámetros geotécnicos y la idoneidad en el manejo de la herramienta y la aplicación correcta de los modelos constitutivos acorde con el problema.

Como se puede ver, el método de Janbu en este caso resulta interesante por su simplicidad y concordancia con los otros métodos utilizados, con el LCPC para el estrato de arena y con el MEF para el estrato de arcilla.

La variación en los resultados muestra que es muy importante el uso de al menos dos métodos de cálculo de capacidad de carga en pilotes para tener un posible rango de variación y con esto tener un mejor criterio para la definición del valor de Qult. En este caso resulta recomendable usar el valor promedio de los tres métodos y definir con base en los asentamientos tolerables si los valores admisibles (Qult/FS) de resistencia son o no apropiados.

REFERENCIAS

[1] ROBERTSON P.K. y CABAL K.L, Guide to Cone Penetration Testing For Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc. 4th Edition 2010.

[2] Das, B.M. Principles of Foundations Engineering 4th Ed. PWS Publishing, 1999.

[3] Fellenius B.H. Basics of Foundation Design, Electronic edition, 2011.

[4] INGEOMINAS, Atlas Geológico de Colombia, 2007.

[5] Brinkgreve R.B.J, Reference Manual Plaxis 2D V8, Delft University of technology and Plaxis b.v, The Netherlands, 2002.