



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL  
COMPORTAMIENTO EN PILOTES DE  
DESPLAZAMIENTO TOTAL EN ARENAS DE  
BAJA CAPACIDAD**

GIZETH AGUILAR

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de  
Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:  
**CHRISTIAN LEDEZMA**

Santiago de Chile, 2021

A mi hijo Marcelito, mi mamá y mis  
hermanos Paola y Rodrigo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi adorado hijo Marce, por ser mi gran motivación e impulsarme siempre a ser cada día mejor, porque el límite sólo es el cielo y tú eres la luz de mi vida.

A mi mamá Irma por su constante apoyo y por haber confiado siempre en mí.

A Paola, por ser mi hermana y mi compañera en todo momento, eres la luz de toda la familia.

A Rodrigo, mi hermano, por todos sus maravillosos consejos.

A la Pontificia Universidad Católica de Chile, por haberme otorgado los cimientos de mi formación profesional.

A mi tutor Christian Ledezma por su orientación, disposición, tiempo y paciencia para ayudarme y apoyarme durante todo este proceso, porque gracias a su guía podré dar por finalizada esta etapa profesional.

## INDICE

### I. CONTENIDO

RESUMEN.....	1
II. INTRODUCCION.....	3
III. OBJETIVOS .....	4
III.1. Pilotes sometidos a carga axial.....	4
III.2. Pilote sometido a carga lateral.....	4
IV. ALCANCES .....	5
IV.1. Pilotes sometidos a carga axial.....	5
IV.2. Pilotes sometidos a carga lateral .....	5
V. MARCO TEORICO .....	6
V.1. Pilotes.....	6
V.1.1. Clasificación de pilotes .....	6
V.1.2. Clasificación de pilotes según el método de transferencia de carga	7
V.2. Pruebas de penetración.....	9
V.2.1. Ensayo de penetración estándar SPT .....	9
V.2.2. Ensayo estático CPT .....	10
V.3. Capacidad de carga última en pilotes .....	13
V.4. Métodos de análisis capacidad de carga axial .....	13
V.4.1. Método de Eslami y Fellenius (1997).....	13
V.4.2. Método de NeSmith (2002) .....	16
V.4.3. Método de la EAP-DIN EN 12699 (2014) .....	20
V.5. Asentamiento del pilote aislado cargado axialmente .....	22
V.5.1. Método de Fellenius (1999).....	23

V.5.2. Función de transferencia hiperbólica Chin (1970).....	24
V.5.3. Método EAP-DIN EN 12669 (2014) .....	27
V.6. Capacidad de carga lateral.....	28
V.6.1. Métodos de análisis de capacidad de carga horizontal .....	29
VI. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL.....	51
VI.1. Prueba de carga .....	51
VI.1.1. Criterio de carga controlada.....	51
VI.1.2. Instalación para una prueba de carga estática.....	53
VI.2. Pilotes de desplazamiento total DD.....	56
VI.3. Pilotes perforados de desplazamiento total (Atlas pile).....	60
VII. METODOLOGÍA.....	63
VII.1. Problema de estudio .....	63
VII.2. Consideraciones Geológicas .....	64
VII.3. Estratigrafía.....	65
VII.4. Pilote cargado axialmente .....	69
VII.4.1. Método experimental .....	69
VII.4.2. Métodos analíticos.....	77
VII.5. Asentamiento del pilote aislado cargado axialmente .....	79
VII.5.1. Fellenius (1999).....	79
VII.5.2. Función de transferencia hiperbólica Chin (1970). .....	79
VII.5.3. EAP-DIN EN 12699 (2014) .....	80
VII.6. Pilotes cargados lateralmente.....	81
VII.6.1. Método de Broms (1965).....	81
VII.6.2. Método elástico Reese (1984) .....	81
VII.6.3. Método no lineal curvas p-y .....	81
VIII. RESULTADOS .....	82

VIII.1. Capacidad del pilote aislado bajo carga axial .....	82
VIII.1.1. Método de Eslami y Fellenius (1997).....	82
VIII.1.2. Método de NeSmith (2002) .....	83
VIII.1.3. Método de la EAP – DIN EN 12699 (2014).....	84
VIII.1.4. Comparación capacidad de carga última $Q_u$ .....	86
VIII.2. Asentamiento pilote aislado carga axial.....	90
VIII.2.1. Ensayo de capacidad de carga a la compresión .....	90
VIII.2.2. Fellenius (1999) - Fellenius (1997) .....	92
VIII.2.3. Función de transferencia hiperbólica Chin - Eslami y Fellenius(1997)	93
VIII.2.4. Fellenius (1999) – Función de transferencia hiperbólica Chin	94
VIII.2.5. Comparación de respuesta analítica y experimental.....	97
VIII.3. Pilote aislado bajo carga lateral.....	102
VIII.3.1. Método de Broms (1965).....	102
VIII.3.2. Evans and Duncan (1982).....	103
VIII.3.3. Método elástico de Reese (1984).....	104
VIII.3.4. Curvas no lineales p-y (2001).....	112
VIII.4. Comparación resultados carga lateral .....	114
VIII.4.1. Deformada de desplazamiento del pilote.....	114
VIII.5. Momento flector.....	115
VIII.6. Diseño estructural del pilote.....	116
IX. CONCLUSIONES .....	118
IX.1.Capacidad de carga última de pilotes .....	118
IX.2.Asentamiento de pilote cargado axialmente.....	119
IX.3.Capacidad de carga lateral.....	120
X. BIBLIOGRAFÍA .....	121

## LISTADO DE FIGURAS

Figura V-1 Pilote de punta (elaboración propia).....	<del>76</del>
Figura V-2 Pilote de fricción (elaboración propia).....	<del>87</del>
Figura V-3 Cono de Penetración CPTu (Tecnología y Proyectos SAC, 2014). ....	<del>11+0</del>
Figura V-4 Ejemplo de mediciones realizadas por el cono de penetración (elaboración propia). ....	<del>12+1</del>
Figura V-5 Clasificación de suelos de datos CPT (adaptada de Eslami y Fellenius, 1997). .....	<del>16+5</del>
Figura V-6 Densificación del suelo circundante al pilote (Bauer, 2013).....	<del>17+6</del>
Figura V-7 Valores experimentales de $f_s$ obtenidos de la prueba de carga en pilotes DD y resultados de CPT (NeSmith, 2002).....	<del>18+7</del>
Figura V-8 Valores experimentales de $f_s$ obtenidos de la prueba de carga en pilotes DD y resultados de SPT (NeSmith, 2002). ....	<del>19+8</del>
Figura V-9 Valores experimentales de $q_t'$ obtenidos de la prueba de carga en pilotes DD y resultados de CPT (NeSmith, 2002).....	<del>19+8</del>
Figura V-10 Valores experimentales de $q_t'$ obtenidos de la prueba de carga en pilotes DD y resultados de SPT (NeSmith, 2002). ....	<del>20+9</del>
Figura V-11 Definición de $K_s$ , factor de flexibilidad de resistencia lateral (De Cock, 2009). .....	<del>25+4</del>

Figura V-12 Curva característica carga-asentamiento. $R_{b,k}(s)$ resistencia por punta, $R_{s,k}(s)$ resistencia por fuste y $R_{c,k}(s)$ resistencia total del pilote.....	<del>27</del> <b>26</b>
Figura V-13 Pilote cargado lateralmente b) Resistencia del suelo de un pilote cargado lateralmente (adaptada de Das, 2012). .....	<del>29</del> <b>28</b>
Figura V-14 Desplazamiento, reacción del suelo y momento flector para un pilote de longitud intermedia con rotación restringida (adaptada de Das, 2012).....	<del>30</del> <b>29</b>
Figura V-15 Deformación, reacción del suelo y momento flector en un pilote largo sometido a cargas laterales en un suelo no cohesivo (Lymon C. Reese, 2001). .....	<del>31</del> <b>30</b>
Figura V-16 Solución gráfica de Broms (1965) para el cálculo de $Q_{u(g)}$ . (adaptada de Das, 2012).....	<del>32</del> <b>31</b>
Figura V-17 Solución de Broms para estimar la deflexión de la cabeza de un pilote en arena (adaptada de Das, 2012). .....	<del>34</del> <b>33</b>
Figura V-18 Coeficiente de desplazamiento para una fuerza horizontal (Manual de Carreteras, 2018). .....	<del>36</del> <b>35</b>
Figura V-19 Coeficiente de momento para la fuerza horizontal (Manual de Carreteras, 2018).....	<del>37</del> <b>36</b>
Figura V-20 Reacción del suelo (adaptada de Das, 2012). .....	<del>38</del> <b>37</b>
Figura V-21 Deflexión en pilotes para la condición de cabeza empotrada (adaptada de Matlock y Reese, 1960).....	<del>41</del> <b>40</b>
Figura V-22 Modelo analítico utilizado en el método no lineal p-y. ....	<del>42</del> <b>41</b>

Figura V-23 Forma característica de la curva p-y en arenas. (adaptada de Reese y Van Impe, 2001).....	<del>434</del> 2
Figura V-24 Valor de los coeficientes de <b>As</b> y <b>Ac</b> (adaptada de Van Impe, 2001). .....	<del>454</del> 4
Figura V-25 Valor de los coeficientes adimensionales de Bs y Bc (adaptada de Reese y Van Impe, 2001) .....	<del>464</del> 5
Figura V-26 Curvas de carga de corte vs. deflexión lateral para condiciones de empotramiento en la arena (adaptada de Evans and Duncan, 1982).....	<del>504</del> 9
Figura V-27 Curva de Carga de corte vs. momento máximo para condiciones de empotramiento en arenas (adaptada de Evans and Duncan, 1982) .....	<del>504</del> 9
Figura VI-1 Control de la prueba (adaptada de Manual de cimentaciones profundas SMMS, 2001).....	<del>525</del> 1
Figura VI-2 Etapa de carga (adaptada de Manual de cimentaciones profundas .....	<del>525</del> 1
Figura VI-3 Resultados de la prueba de carga (adaptada de Manual de cimentaciones profundas SMMS, 2001) .....	<del>535</del> 2
Figura VI-4 Sistema Hidráulico, equipo de aplicación de carga (adaptada de Manual de cimentaciones profundas SMMS, 2001) .....	<del>555</del> 4
Figura VI-5 Herramienta de desplazamiento (Bauer, 2018). .....	<del>565</del> 5
Figura VI-6 Plataforma de instalación (adaptada de NeSmith 2002). .....	<del>575</del> 6
Figura VI-7 Presiones de instalación de la inyección de concreto (adaptada de .....	<del>585</del> 7
Figura VI-8 Pasos de instalación pilote de desplazamiento total DD (Bauer, 2013).....	<del>595</del> 8

Figura VI-9 Pasos de instalación pilote de desplazamiento Atlas (Mónica Prezzi, 2005). .....	<del>626</del>
Figura VII-1 Mapa geológico de Bolivia. ....	<del>656</del>
Figura VII-2 Ubicación de los ensayos SPT y los pilotes de prueba en la zona de estudio (Google Earth).....	<del>666</del>
Figura VII-3 a. Perfil SPT (golpes/pie), b) Perfil CPT $q_c$ (MPa) correlacionado. ....	<del>686</del>
Figura VII-4 Corte longitudinal del ensayo a distintos sellos de fundación. ....	<del>706</del>
Figura VII-5 Vista en planta de los ensayos de carga P1, P2 y P3 en el módulo del rectorado. .....	<del>717</del>
Figura VII-6 Vista en planta de los ensayos de carga P4 y P5 en el módulo de la sala de computación. ....	<del>717</del>
Figura VII-7 Vista en planta del ensayo de carga del pilote de prueba P1. ....	<del>727</del>
Figura VII-8 Vista en planta del ensayo de carga del pilote de prueba P2. ....	<del>727</del>
Figura VII-9 Vista en planta del ensayo de carga del pilote de prueba P3. ....	<del>737</del>
Figura VII-10 Vista en planta del ensayo de carga del pilote de prueba P4. ....	<del>737</del>
Figura VII-11 Vista en planta del ensayo de carga del pilote de prueba P5. ....	<del>747</del>
Figura VII-12 Vista general del ensayo de carga.....	<del>757</del>
Figura VII-13 Vista del montaje de los comparadores sobre el pilote de prueba. ....	<del>757</del>
Figura VIII-1 Capacidad de carga ultima (Eslami y Fellenius, 1997). ....	<del>828</del>
Figura VIII-2 Capacidad de carga última (NeSmith, 2002).....	<del>838</del>

Figura VIII-3 Capacidad de carga última (EAP-DIN 12699, 2014). .....	8584
Figura VIII-4 Comparación de capacidad última $Q_u$ del pilote de prueba P1.....	8685
Figura VIII-5 Comparación de capacidad última $Q_u$ del pilote de prueba P2.....	8786
Figura VIII-6 Comparación de capacidad última $Q_u$ del pilote de prueba P3.....	8786
Figura VIII-7 Comparación de capacidad última $Q_u$ del pilote de prueba P4.....	8887
Figura VIII-8 Comparación de capacidad última $Q_u$ del pilote de prueba P5.....	8887
Figura VIII-9 Curvas carga-asentamiento experimental pilotes de prueba.....	9190
Figura VIII-10 Curvas carga vs. asentamiento (Fellenius, 1999 – Eslami y Fellenius, 1997). .....	9294
Figura VIII-11 Curvas carga vs. asentamiento (Función de transferencia hiperbólica de Chin – Eslami y Fellenius, 1997).....	9392
Figura VIII-12 Comparación de las curvas carga vs. asentamiento (Fellenius, 1999 y la Función de transferencia hiperbólica; Fellenius, 1997). .....	9493
Figura VIII-13 Curvas carga vs. asentamiento (Fellenius, 1999NeSmith, 2002). .....	9594
Figura VIII-14 Curvas carga vs. asentamiento (EAP-DIN EN 12699, 2014).....	9695
Figura VIII-15 Curva carga vs. asentamiento del pilote de prueba P1. ....	9796
Figura VIII-16 Comparación curvas carga vs. asentamiento del pilote de prueba P2. ..	9897
Figura VIII-17 Comparación curvas carga vs. asentamiento del pilote de prueba P3. ..	9998
Figura VIII-18 Comparación curvas carga vs. asentamiento del pilote de prueba P4. ....	10099
Figura VIII-19 Comparación curva carga vs. asentamiento del pilote de prueba P5. ....	101+00

Figura VIII-20 Deformada y momento flector del pilote en arenas.....	<a href="#">105+04</a>
Figura VIII-21 Curvas no lineales p-y en arena a distintas profundidades de la cota 0 a 13.75m.....	112
Figura VIII-22 Deformada de desplazamiento y momento flector del pilote modelado mediante curvas no lineales p-y en arena a distintas profundidades de la cota 0 a 13.75 m. ....	113
Figura VIII-23 Comparación de las deformaciones vs. profundidad del pilote en arena.	114
Figura VIII-24 Comparación del momento flector en el pilote restringido al giro.....	115
Figura VIII-25 Diagrama de Interacción.....	116
Figura VIII-26 Armadura longitudinal y transversal del pilote de desplazamiento total.	117

## LISTADO DE TABLAS

Tabla V-1 Factores de conversión para ensayos SPT (EAP - DIN EN 12699, 2014). ...	<del>13</del> <sup>12</sup>
Tabla V-2 Coeficiente de fricción lateral $C_s$ (Eslami y Fellenius, 1997).....	<del>16</del> <sup>15</sup>
Tabla V-3 Factores de NeSmith (2002). .....	<del>20</del> <sup>19</sup>
Tabla V-4 Rango de datos empíricos para la resistencia característica de la punta $q_{b,k}$ para pilotes Atlas en suelos no cohesivos. ....	<del>22</del> <sup>21</sup>
Tabla V-5 Rango de datos empíricos para la resistencia característica de la fricción lateral $q_{s,k}$ para pilotes Atlas en suelos no cohesivos.....	<del>22</del> <sup>21</sup>
Tabla V-6 Valores de $m$ (De Cock, 2009). .....	<del>26</del> <sup>25</sup>
Tabla V-7 Valores de $k_{py}$ recomendados (Terzaghi, 1955). .....	<del>33</del> <sup>32</sup>
Tabla V-8 Coeficientes de ajuste para pilotes largos $k=k_{pyz}$ (Das, 2012).....	<del>38</del> <sup>37</sup>
Tabla V-9 Variación de coeficiente $F_m$ . .....	<del>41</del> <sup>40</sup>
Tabla V-10 Valores de $k_{py}$ representativos para arenas. ....	<del>46</del> <sup>45</sup>
Tabla V-11 Valor típico de $\epsilon_{50}$ (Reese and Wang,1997). .....	<del>49</del> <sup>48</sup>
Tabla V-12 Valores de exponente $m$ y $n$ (Evans and Duncan, 1982). .....	<del>49</del> <sup>48</sup>
Tabla VII-1 Dimensiones y coordenadas de los pilotes de prueba. ....	<del>64</del> <sup>63</sup>
Tabla VII-2 Coordenadas geográficas de los ensayos SPT y los pilotes de prueba.....	<del>66</del> <sup>65</sup>
Tabla VII-3 Parámetros geotécnicos de la estratigrafía. ....	<del>67</del> <sup>66</sup>
Tabla VII-4 Características técnicas de la barra.....	<del>76</del> <sup>75</sup>

Tabla VII-5 Valores $q_E$ (MPa) correlacionados con los valores SPT (golpes/pie). .....	<del>77</del> <u>76</u>
Tabla VII-6 Valores $q_c$ (MPa) correlacionados con los valores SPT(golpes/pie).....	<del>77</del> <u>77</u>
Tabla VII-7 Porcentaje de finos que pasa el Tamiz N°200.....	<del>77</del> <u>77</u>
Tabla VII-8 Métodos analíticos para generar la curva carga vs. asentamiento.....	<del>79</del> <u>78</u>
Tabla VIII-1 Capacidad analítica de carga última (Eslami y Fellenius, 1997). .....	<del>83</del> <u>82</u>
Tabla VIII-2 Capacidad de carga última (NeSmith, 2002). .....	<del>84</del> <u>83</u>
Tabla VIII-3 Capacidad de carga última (EAP-DIN EN 12699, 2014). .....	<del>85</del> <u>84</u>
Tabla VIII-4 Comparación de resultados. ....	<del>86</del> <u>85</u>
Tabla VIII-5 Diferencia porcentual.....	<del>89</del> <u>88</u>
Tabla VIII-6 Desplazamiento y momento flector máximo para una carga de 3.5(Ton). .....	<del>105</del> <u>104</u>

## RESUMEN

Los pilotes de desplazamiento son una solución de pilotaje profundo frecuentemente utilizada en estratos de suelos poco competentes, como los que se encuentran en la ciudad de Santa Cruz Bolivia. El equipo de ejecución permite producir una densificación en el suelo desplazado y de esta forma aumentar la capacidad de carga por fuste, lo que hace que esta técnica sea más competitiva frente a pilotes ejecutados convencionalmente.

En la presente tesis se analizó una comparación entre las mediciones experimentales y diversos modelos analíticos para pilotes de pequeño diámetro en suelos de baja capacidad. Para llevar a cabo esta comparación se ejecutaron ensayos de compresión en cinco pilotes de prueba construidos individualmente mediante el sistema de desplazamiento total. La información obtenida de los ensayos evalúa el comportamiento de cada pilote y permite generar las curvas de carga vs. asentamiento en la cabeza del pilote. Los resultados obtenidos de los ensayos de carga estática fueron comparados con las curvas obtenidas a partir de los métodos analíticos para el diseño de pilotes. Donde se pudo observar que los métodos analíticos que mejor se ajustan a las curvas experimentales son el de [NeSmith](#) (2002) y el de la EAP-DIN EN 12699 (2014). En los pilotes largos se debe limitar la capacidad de carga de acuerdo a la capacidad estructural del pilote, los pilotes P1=13.5 m y P5=11.90m, ensayados fallaron estructuralmente a las 150 (ton) y 135 (ton) respectivamente.

Adicionalmente, se realizó el análisis de carga lateral para el pilote P1 de 13.75 m. Para el análisis se utilizaron distintos métodos analíticos, los cuales permitieron reemplazar el suelo por balastos equivalentes con comportamiento lineal y no lineal.

En la práctica profesional en Chile se utiliza el Manual de Carreteras (2018), metodología que considera el comportamiento del suelo como elástico.

De acuerdo con los análisis realizados, se pudo observar que los esfuerzos internos y los desplazamientos de la estructura deformada resultante aplicando el método lineal son menores respecto al no lineal para una misma fuerza horizontal por lo que se estaría menospreciando la influencia que este presenta en los resultados y en las cuantías de los pilotes. Además, mediante el uso del software estructural Civil Midas y el Software

Comentado [A1]: ¿y qué pudiste concluir?

geotécnico LPile Ensoft, se modelaron los balastos horizontales que representan la respuesta no lineal del suelo mediante las curvas p-y a distintas profundidades.

## II. INTRODUCCION

La ciudad de Santa Cruz de la Sierra - Bolivia se encuentra ubicada en suelos de origen aluvial, que se caracterizan por la forma de deposición y distribución de sus capas que son muy variables y con niveles freáticos poco profundos. Los depósitos son considerablemente heterogéneos. Por las características geotécnicas de estos suelos se utilizan fundaciones profundas para poder soportar las estructuras, procedimiento utilizado en la actualidad para la edificación en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra.

El tipo de pilotes comúnmente utilizados en la práctica tradicional fueron los pilotes hincados. Este método en áreas urbanizadas puede causar fisuras y asentamiento en las viviendas vecinas. Actualmente, en zonas urbanas, lo usual es utilizar pilotes de desplazamiento total (*Full Displacement Piles*).

Se evaluó el comportamiento bajo cargas axiales y laterales de pilotes instalados mediante este procedimiento constructivo en base a los métodos analíticos proporcionados en la literatura actual. La motivación del presente trabajo fue realizar la comparación de los ensayos a compresión de carga última a escala real con los métodos analíticos y los resultados de los softwares geotécnicos utilizados en los despachos de ingeniería, con el fin de establecer cuál de estos métodos tiene una mejor aproximación con la curva de capacidad última experimental, en función de las características de los suelos de baja capacidad encontrados en la zona de estudio. Para lograr este objetivo, se tomaron en consideración los ensayos de cinco pilotes de prueba construidos por la empresa Terra Foundations Bolivia S.A., para el proyecto Universidad Privada del Valle mediante el sistema de desplazamiento total.

Estos pilotes fueron diseñados principalmente para soportar cargas axiales teniendo especial cuidado que éstas no excedan los valores permisibles del suelo o la capacidad estructural de los pilotes.

La fundación profunda también puede estar sometida a cargas laterales derivadas de los empujes de viento, fuerzas de corriente de agua, efectos sísmicos, etc., y estas fuerzas serán resistidas por la movilización de la presión pasiva en el suelo que lo rodea. El grado de distribución de la reacción del suelo depende de la rigidez del pilote, la rigidez del suelo y el tipo de restricción en el extremo del pilote.

Se realizó un análisis desacoplado de las cargas axiales que permitió determinar su capacidad última, asentamiento y posteriormente el comportamiento flexural del pilote, sometido a cargas laterales mediante métodos analíticos y softwares que permitieron modelar el comportamiento lineal y no lineal del suelo.

### **III. OBJETIVOS**

#### **III.1. Pilotes sometidos a carga axial**

El objetivo del presente trabajo consistió en realizar una comparación de cinco ensayos de capacidad de carga última a compresión efectuados a escala real, con los métodos analíticos utilizados para el cálculo de capacidad de pilotes como el método de Eslami y Fellenius (1997), NeSmith (2002) y el EAP - DIN EN 12699 (2014). Esta comparación se realizó en suelos donde predominan las arenas finas a medias de mala gradación. Este tipo de suelos se clasifican como SP-SM, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS. Esta comparación permitirá determinar cuál es el método que presenta mejor correlación respecto a los resultados experimentales obtenidos in situ.

#### **III.2. Pilote sometido a carga lateral**

Frente a cargas laterales el objetivo fue evaluar y comparar los métodos analíticos que permitan calcular los esfuerzos internos y desplazamientos en un pilote restringido a la rotación en la cabeza, considerando un comportamiento lineal y no lineal del suelo.

Se estudió la respuesta lineal de un pilote de acuerdo con lo indicado en el Manual de Carreteras Vol. N°3 (2018) utilizado en Chile, en comparación con el método no lineal basado en curvas no lineales p-y para arenas las cuales permiten determinar los cambios de resistencia del suelo de acuerdo con el rango esperado de desplazamientos. En vista que el comportamiento del suelo es de carácter no lineal, estas curvas dependen de las características geométricas del pilote, tipo de suelo y sus propiedades de esfuerzo deformación.

Los pilotes al estar sometidos a esfuerzos de flexo-compresión, deben poseer una capacidad estructural adecuada para soportar las combinaciones de carga que experimentarán a lo largo de su vida útil, por lo que se efectuó el diseño estructural del pilote mediante el diagrama de interacción conforme al ACI 318 (2019).

#### IV. ALCANCES

El alcance de la presente tesis es comparar las curvas de capacidad última obtenidas de las pruebas de terreno y lo que predicen distintos métodos analíticos, mediante el estudio de cinco pilotes cargados axialmente con distintos sellos de fundación. Los ensayos de carga se realizaron in situ a escala real en arenas de baja capacidad. Estos pilotes de prueba se ejecutaron bajo el sistema de desplazamiento total (*Full Displacement Piles*), de sección transversal circular de 0.36 m de diámetro y diferentes longitudes.

También se analizó la respuesta lateral del pilote más largo correspondiente a 13.75 m para una carga horizontal de 3.5 (Ton) la cual está dentro el rango de comportamiento lineal del pilote.

##### IV.1. Pilotes sometidos a carga axial

A continuación, se enuncian los métodos de cálculo utilizados para el análisis de capacidad de carga axial.

- a) Método de Eslami-Fellenius (1997);
- b) Método de NeSmith (2002);
- c) Método EAP -DIN EN 12699 (2014).

Las curvas de carga vs. asentamientos se generaron mediante los siguientes métodos:

- a) Método de Fellenius (1999);
- b) Función de Transferencia Hiperbólica Chin (1970);
- c) Método EAP – DIN EN 12699 (2014).

Para poder establecer una comparación adecuada se utilizó el software AXPILE-GGU, el cuál sigue las recomendaciones de la EAP, que nos permite calcular la curva de capacidad de carga última de acuerdo a las características geotécnicas del suelo.

##### IV.2. Pilotes sometidos a carga lateral

Los métodos de cálculo utilizados para el análisis de carga lateral son los siguientes:

- a) Método de Broms (1965);
- b) Método elástico de Reese (1984);
- c) Método de Matlock y Reese (1960);
- e)d) Método no lineal curvas p-y;

**Comentado [A2]:** El alcance es la comparación entre las pruebas de terreno y lo que distintos modelos analíticos predicen. Corregir.

**Comentado [A3]:** ¿solo axialmente? En el resumen aparece lo de carga lateral.

**Comentado [A4R3]:** También se analizó la respuesta del pilote para una carga lateral de 3.5 (Ton) la cual se encontraba dentro el rango lineal del comportamiento del pilote.

**Comentado [A5R3]:**

**Comentado [A6]:** Esta publicación NO está en la bibliografía.

**Comentado [A7R6]:** Incluye la publicación en la Bibliografía

**Comentado [A8R6]:**

**Comentado [A9]:** Esta publicación NO está en la bibliografía.

**Comentado [A10R9]:** GERMAN GEOTECHNICAL SOCIETY. (2014). Recommendations on Piling (EA-Pfähle). Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Berlin, Alemania.

**Comentado [A11]:** ¿referencia?

**Comentado [A12R11]:** CHIN, F.K. (1970). Estimation of the Ultimate Load of Piles not Carried to Failure, *Proceedings of the second Southeast Asian Soil Conference in Soil Engineering*, pp. 80-90.

**Comentado [A13]:** Esta publicación NO está en la bibliografía.

**Comentado [A14R13]:** BROMS, BENGT B. (1965). Design of Laterally Loaded Piles, *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 91, No. SM3, pp. 79-99.

**Comentado [A15]:** ¿"Solución Elástica" en un libro? ... esta no es la forma de citar.

**Comentado [A16R15]:** Problema aún no resuelto.

**Comentado [A17R15]:** Método elástico de Reese (1984)

**Comentado [A18]:** Mismo comentario anterior.

**Comentado [A19R18]:** Mismo comentario.

➔) Método de Evans and Duncan (1982).

Para poder establecer una comparación se utilizó el software Civil Midas y Lpile de Ensoft que nos permite calcular las deformaciones y esfuerzos internos del pilote para una carga de 3.5 (Ton).

## V. MARCO TEORICO

Las cimentaciones profundas se utilizan para transmitir las cargas de la cimentación a través de estratos de suelo poco competentes hasta estratos más profundos que posean una capacidad resistente más elevada.

Se emplean en terrenos para resistir las fuerzas de compresión y tracción, contrarrestar las cargas horizontales y en grupos de pilotes para resistir los momentos flexurales.

### V.1. Pilotes

Los pilotes son miembros estructurales de gran esbeltez, pertenecen a la categoría de cimentaciones profundas, y transfieren las cargas a estratos resistentes más profundos.

En la construcción se utilizan pilotes de distintos materiales, dependiendo del tipo de carga que soportan los cuales pueden ser pilotes de gran diámetro o de pequeño diámetro, esto depende de las condiciones de los estratos de suelo y la ubicación del nivel freático.

#### V.1.1. Clasificación de pilotes

Los pilotes se clasifican en dos grupos:

- Pilotes (pre) excavados
- Pilotes por desplazamiento

Los pilotes excavados son definidos como aquellos en los cuales el suelo es reemplazado durante la construcción, el reemplazo provoca una reducción de la tensión lateral del suelo sobre el pilote. El material de reemplazo es el hormigón armado.

Los pilotes por desplazamiento son aquellos que desplazan el suelo radialmente durante su ejecución aumentando la resistencia del suelo y por ende su capacidad portante. Según DIN EN 12699 y DIN SPEC 18538 los pilotes de desplazamiento se caracterizan por ser instalados sin excavación o eliminación del suelo.

**Comentado [A20]:** Esta publicación NO está en la bibliografía.

**Comentado [A21R20]:** Se mantiene el comentario.

**Comentado [A22R20]:** EVANS L.T. AND DUNCAN, J.M. (1982). Simplified Analysis of Laterally Loaded Piles, Report No. UCB/GT/82-04, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.

**Comentado [A23R20]:**

### V.1.2. Clasificación de pilotes según el método de transferencia de carga

Dependiendo de la longitud y su mecanismo de transferencia de carga al suelo, los pilotes pueden clasificarse en:

#### a) Pilotes de punta

Son aquellos encargados de transferir cargas de la superestructura a través de estratos débiles o compresibles, hasta estratos inferiores con la suficiente capacidad de carga para soportar la estructura, comportándose el pilote como una extensión de columna o pilar. La capacidad de estos pilotes depende directamente del suelo de apoyo, estos estratos pueden ser roca, arcillas duras o suelos de baja compresibilidad. Por otra parte, si se encuentra un estrato bastante compacto y duro, los pilotes deberán prolongarse unos cuantos metros dentro de dicho estrato. Ver [Figura V-1](#).

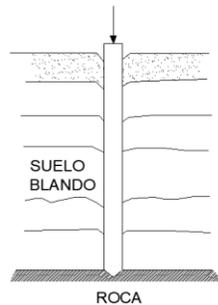


Figura V-1 Pilote de punta (elaboración propia).

#### b) Pilotes de fricción

Cuando los estratos inferiores no son suelos duros o rocas, los pilotes de punta pueden ser muy largos y antieconómicos. Para esta condición el sello de fundación de los pilotes se coloca a profundidades determinadas a través de material más suave, donde el pilote debe transferir o repartir la carga sobre un suelo relativamente suelto mediante la fricción o adhesión de la superficie entre el pilote y el suelo.

La longitud de estos pilotes por fricción depende de la resistencia del suelo, de la carga axial aplicada y de la sección transversal del pilote. Ver [Figura V-2](#).

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

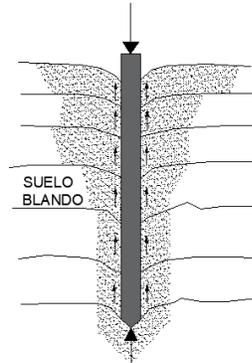


Figura V-2 Pilote de fricción (elaboración propia).

### c) Pilotes de compactación

En algunas condiciones, los pilotes se hincan en suelos granulares para obtener una compactación adecuada del suelo cercano a la superficie del terreno, estos pilotes por lo general son cortos (Das, 2012).

La longitud de los mismos depende de los siguientes factores:

- La compacidad relativa del suelo antes de la compactación;
- La compacidad relativa esperada después de la compactación;
- La profundidad requerida de compactación.

De acuerdo con lo señalado por Das (2002), los requisitos básicos de diseño de una cimentación profunda pueden resumirse en:

- Los esfuerzos en los materiales estructurales del pilote no deben sobrepasar límites especificados.
- El factor de seguridad relativo a falla de corte en el suelo de soporte debe ser suficiente.
- Los asentamientos deben ser tolerables para la función de los pilotes.

El debido cumplimiento de estos requisitos conduce en la práctica a la necesidad de establecer la capacidad de carga de los pilotes, para resistir la acción de las cargas sin falla o asentamientos mayores a los admisibles, que depende del comportamiento de los diferentes elementos que integran el sistema suelo - cimentación.

## **V.2. Pruebas de penetración**

Los penetrómetros son conos o tubos de acero que se hincan a presión (estáticos) o con el impacto de una masa (dinámicos) y permiten definir indirectamente la estratigrafía del sitio, la variación de compacidad relativa y la resistencia al corte drenada de las arenas con la profundidad, así como la resistencia al corte no-drenada en las arcillas. Con el penetrómetro estándar se recuperan, además, muestras alteradas que permiten definir confiablemente la estratigrafía. Cabe aclarar que la resistencia al corte drenado de las arenas depende de la permeabilidad de éstas, así como de sus condiciones de frontera para el flujo de agua; aunque esto es cuestionable cuando las arenas están contaminadas con limos y se tratan de ensayos de penetración dinámica.

### **V.2.1. Ensayo de penetración estándar SPT**

El ensayo de penetración estándar SPT se encuentra normado por ASTM N° D1586-18. Consiste en aplicar energía a un martillo estandarizado de 63.5 kg mediante la caída desde una altura de 76 cm sobre un muestreador normalizado hueco de 5 cm de diámetro (tipo cuchara partida), obteniendo de esta manera la resistencia del suelo a ser penetrado.

El resultado del ensayo se expresa como  $N_{SPT}$ , que es el número de golpes necesarios para que el muestreador penetre en el suelo 30 cm, dicho resultado puede ser correlacionado para estimar parámetros de suelo tales como: ángulo de fricción interna efectivo ( $\phi'$ ), cohesión ( $c$ ), densidad relativa  $D_r$  (%), módulo de Young ( $E$ ), entre otros. Entre sus ventajas se encuentra:

- Costo relativamente bajo.
- Fácil ejecución en campo.
- Obtención de muestras de campo sobre las cuales es posible efectuar ensayos como: peso unitario ( $\gamma$ ), compacidad relativa ( $C_r$ ), granulometría, límites de consistencia, humedad natural, etc.

Dentro las desventajas se tienen que en suelos de consistencia blanda se pueden obtener número de golpes muy bajos  $N_{SPT} < 5$  (golpes/pie) lo cual dificulta realizar la caracterización de la resistencia a la penetración del terreno de forma adecuada, teniendo que realizar otro tipo de ensayos que suministren información más precisa, como el ensayo de penetración

cónica CPT. Además de lo mencionado el SPT presenta una alta incertidumbre, variabilidad, y dependencia del operador del equipo.

Existen ciertas características que son importantes destacar en relación con la ejecución del ensayo SPT y en relación con los resultados obtenidos en el mismo.

Los valores de penetración se reportan cada 15 cm. Deberán tomarse en cuenta el número de golpes de los últimos dos intervalos por tramo, es decir, únicamente los golpes referidos a los últimos 30 cm de penetración. Los primeros 15 cm se utilizan para penetrar cualquier relleno o material perturbado situado en el fondo de la perforación y así asentar el muestreador en el suelo natural no perturbado.

Para profundidades superiores a los 2 m, la medición de penetración se realiza en intervalos de 1 m y de igual forma se toman en cuenta el número de golpes correspondiente a los últimos 30 cm de penetración.

Para alcanzar las profundidades de sondeo requeridas se utiliza una broca o barreno que avanza a través del terreno hasta la profundidad establecida en la investigación geotécnica. Se debe reportar la profundidad donde se ubique el nivel freático o la presencia de aguas subterráneas.

El ensayo se detiene en caso de un número de golpes ( $N_{SPT}$ ) mayor a 80 (golpes/pie), puesto que ello indica la presencia de material rocoso o suelo muy denso, pudiendo requerirse el cambio de equipo de perforación y la utilización de otro tipo de ensayos, tales como el ensayo de Índice de Calidad de Roca RQD (Rock Quality Designation).

Las muestras obtenidas mediante el ensayo SPT se consideran “muestras perturbadas”.

### **V.2.2. Ensayo estático CPT**

Este tipo de ensayo CPT (Cone Penetration Test), consiste en empujar dentro del suelo una barra instrumentada con punta cónica a velocidad constante midiendo el esfuerzo necesario para la penetración del cono,  $q_c$ .

Los ensayos de penetración estática se realizan en suelos granulares y en suelos cohesivos de consistencia blanda, ya que la presencia de bolones, gravas, suelos cementados y roca produce el rechazo y daño del equipo. Si al equipo CPT se le instala en la punta un sensor capaz de medir la presión intersticial, éste se denominará Piezocono CPTu.

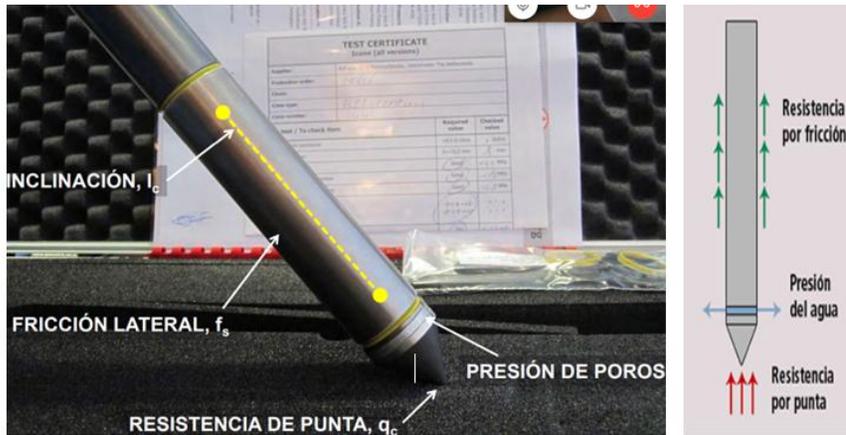


Figura V-3 Cono de Penetración CPTu (Tecnología y Proyectos SAC, 2014).

El procedimiento, ejecución y presentación de los resultados de estos ensayos se deben ajustar a lo indicado en la ASTM D 3441.

El ensayo de penetración con el cono CPT tiene por objetivo principal la medida de modo continuo o a intervalos de profundidad determinados, de la resistencia a la penetración del cono (resistencia por punta), y la resistencia a la fricción lateral local. El equipo empleado debe ser capaz de medir independientemente la resistencia por punta y el rozamiento lateral (fuste).

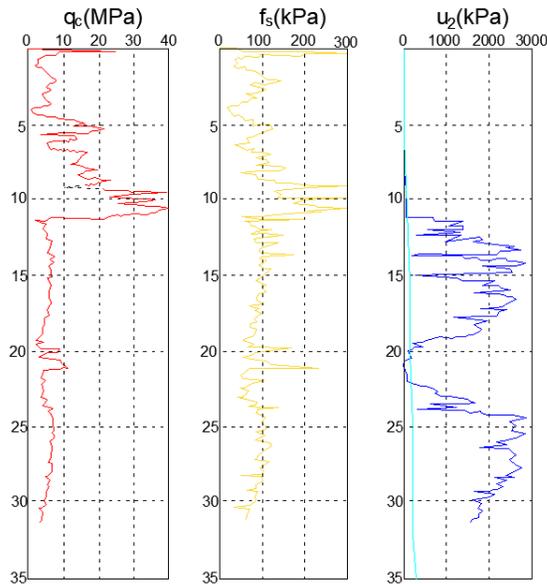


Figura V-4 Ejemplo de mediciones realizadas por el cono de penetración (elaboración propia).

De la ~~Figura V-4~~ ~~Figura V-4~~ se tiene :

$q_c$  = Resistencia a la penetración por punta (MPa)

$f_s$  = Rozamiento lateral (kPa)

$u_2$  = Presión del agua (kPa)

El ensayo de penetración con el piezocono (CPTu) es una variante del CPT con la particularidad complementaria que permite medir las presiones de poro o pesiones intersticiales del suelo durante la penetración.

Según las recomendaciones de pilotaje de la Sociedad Geotécnica de Alemania en la EAP - DIN EN 12600 (2014), se recomienda el uso de la ~~Tabla V-1~~ ~~Tabla V-1~~ la cual muestra una relación aproximada entre el valor de correlación SPT y  $q_c$ , en caso de no contar con valores de este último.

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

**Código de campo cambiado**

**Comentado [A24]:** Falta algo de texto antes de esto.

**Comentado [A25R24]:** Se mantiene el comentario.

**Comentado [A26R24]:** Algo pasa con el formato ... temas de referencias en Word, creo.

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

Tabla V-1 Factores de conversión para ensayos SPT (EAP - DIN EN 12699, 2014).

Tipo de Suelo	$q_c/N_{30}$ (MN/m <sup>2</sup> )
Arenas medias a finas o arena ligeramente limosa	0.3 a 0.4
Arena, o arena con algún contenido de grava	0.5 a 0.6
Arena bien graduada	0.5 a 1
Arena gravosa o grava	0.8 a 1

### V.3. Capacidad de carga última en pilotes

La resistencia que tiene un pilote viene determinada por la capacidad de carga en la punta del pilote y por la resistencia de fuste, que de acuerdo con el tipo de estrato de apoyo y al suelo circundante, uno de estos valores tendrá mayor influencia en la capacidad del pilote.

La capacidad de carga última  $Q_u$  de un pilote se determina de la siguiente manera:

$$Q_u = Q_b + Q_s \quad (1.1)$$

Donde:

$Q_b$  = Resistencia de la punta del pilote.

$Q_s$  = Resistencia en la interfaz suelo-pilote.

### V.4. Métodos de análisis capacidad de carga axial

#### V.4.1. Método de Eslami y Fellenius (1997)

Eslami y Fellenius (1997) utilizaron los resultados de 102 ensayos de carga estática a escala real de 40 sitios distintos en 13 países, realizando sondajes CPT para desarrollar un método de evaluación de carga axial. Todas las pruebas de carga fueron ejecutadas en pilotes, y las condiciones de suelo oscilaron entre arcilla suave y arena gravosa.

Este método toma beneficios de los datos adicionales adquiridos a través del ensayo CPT<sub>u</sub>, el cual es una prueba CPT estándar equipada con un piezómetro para medir la presión de poro del agua cerca de la punta del cono mientras la prueba está en ejecución.

Esta presión de poros de agua es la suma de la presión de poro hidrostática (tal que puede ser medida utilizando un piezómetro estacionario convencional) y cualquier exceso de la

presión de agua de poro inducida por el avance del cono. En suelos arenosos, el exceso de presión de poro de agua usualmente es muy pequeña, pero en arcillas puede ser muy grande. Cuando se usan piezoconos, los datos de presión de poro son combinados con los valores medidos  $q_c$  para obtener la resistencia corregida del cono  $q_T$ . Los factores de corrección dependen de los detalles del piezocono, así que esta corrección normalmente es aplicada cuando los datos CPT originales son reducidos, y se le provee una gráfica de  $q_T$  vs. profundidad.

El método de Eslami y Fellenius (1997), requiere la aplicación de una corrección de presión de poros de agua adicional a los valores de  $q_T$  tal como se muestra:

$$q_E = q_T - u_2 \quad (1.2)$$

Donde:

- $q_E$  = Resistencia de cono efectiva.
- $q_T$  = Resistencia de cono corregida.
- $u_2$  = Presión de poro de agua medida detrás de un punto del cono.

Esta corrección tiene por objeto acercarse lo más posible a un análisis de esfuerzos efectivos. En suelos no cohesivos,  $u_2$  debería ser aproximadamente igual a la presión de poros de agua hidrostática. De tal forma que este método también puede ser usado en arenas incluso si solo se cuenta con datos CPT convencionales (sin contar con datos de presión de poros), se puede hacer esto siempre y cuando el nivel freático es conocido y no estén presentes condiciones artesianas.

#### **a) Capacidad por punta**

Este método correlaciona la resistencia por punta neta  $q'_n$ , con la resistencia efectiva de cono  $q_E$ . Las fallas por capacidad de punta ocurren como resultado del punzonamiento y del corte local, y por lo tanto afecta solo a los suelos de influencia cercanos a la punta. Por lo tanto, el análisis sólo considera el valor de  $q_E$  en las siguientes zonas:

- Para pilotes instalados a través de suelos débiles y dentro suelos densos: 8 veces el diámetro sobre la punta y 4 veces el diámetro bajo la punta del pilote.
- Para pilotes instalados a través de un suelo denso y dentro un suelo débil: 2 veces el diámetro sobre la punta y 4 veces el diámetro bajo la punta del pilote.

El valor de  $q_{Eg}$ , de los  $n$  valores medidos de  $q_E$  dentro del rango de profundidad definido se calcula mediante la siguiente expresión:

$$q_{Eg} = \frac{(q_E)_1(q_E)_2(q_E)_3 \dots (q_E)_n}{n} \quad (1.3)$$

La resistencia neta de la capacidad de punta se ha correlacionado empíricamente con  $q_{Eg}$  utilizando los resultados de la prueba de carga.

$$q'_t = C_t q_{Eg} \quad (1.4)$$

Donde:

- $q'_t$  = Resistencia neta unitaria de capacidad por punta.
- $C_t$  = Coeficiente de la capacidad por punta
- $q_{Eg}$  = Promedio geométrico de la resistencia efectiva del cono.

Eslami y Fellenius (1997), recomiendan usar  $C_t=1$  para fundaciones de pilotes en cualquier tipo de suelo. Además, a diferencia de otros métodos, no presenta ningún límite superior para  $q'_t$ .

#### b) Resistencia por fuste

El procedimiento para calcular la resistencia de fricción lateral unitaria  $f_s$  es similar al método utilizado para calcular  $q'_n$ . Se realiza un análisis de fricción lateral para cada punto de datos de CPT utilizando la siguiente ecuación:

$$f_s = C_s q_E \quad (1.5)$$

Donde:

- $f_s$  = Resistencia de fricción lateral unitaria.
- $C_s$  = Coeficiente de fricción lateral.
- $q_E$  = Resistencia efectiva del cono.

El valor de  $C_s$  depende del tipo de suelo y debe seleccionarse utilizando la [Tabla V-2](#) ~~Tabla V-2~~. Esta clasificación del suelo puede determinarse directamente a partir de los datos de CPT utilizando la [Figura V-5](#). ~~Error! No se encuentra el origen de la referencia.~~

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Tabla V-2 Coeficiente de fricción lateral  $C_s$  (Eslami y Fellenius, 1997).

Tipo de Suelo	$C_s$	
	Rango	Valor típico de diseño
Suelos blandos sensibles	0.0737 - 0.0864	0.08
Arcilla	0.0462 - 0.0556	0.05
Arcilla rígida o mezcla de arcilla y limo	0.0206 - 0.0280	0.025
Mezcla de limo y arena	0.0087 - 0.0134	0.01
Arena	0.0034 - 0.0060	0.004

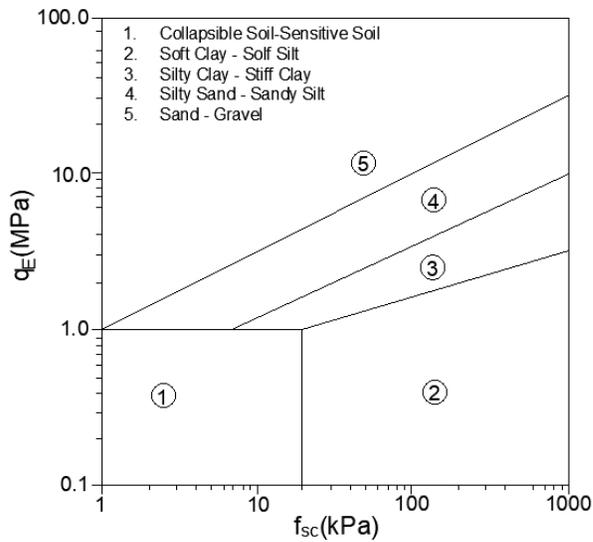


Figura V-5 Clasificación de suelos de datos CPT (adaptada de Eslami y Fellenius, 1997).

#### V.4.2. Método de NeSmith (2002)

Los pilotes de desplazamiento total (*Full displacement DD piles*) confinan el suelo circundante como parte del proceso de construcción, lo que aumenta las presiones laterales del suelo. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura V-6. Sin embargo, la viabilidad de ejecución de los pilotes DD en suelos más densos está limitada por la capacidad

de torque del equipo de perforación, por lo que normalmente se usan sólo en suelos más sueltos y blandos.

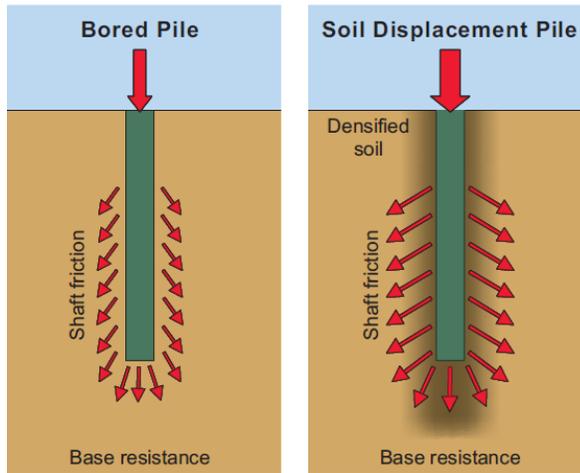


Figura V-6 Densificación del suelo circundante al pilote (Bauer, 2013).

Las presiones laterales de los suelos posterior a la construcción deben ser similares a las presiones de pilotes hincados de diámetro similar. Además, los pilotes de desplazamiento total DD tienen una interfaz de suelo-pilote muy rugosa, que es superior a los pilotes hincados, y el diámetro según la construcción puede ser ligeramente mayor, especialmente en zonas donde el suelo es más blando. Por lo tanto, la capacidad de fricción lateral en los pilotes de desplazamiento total DD debe ser al menos igual y probablemente algo mayor que en los pilotes hincados de diámetro nominal comparable.

La construcción de pilotes DD no proporciona ningún beneficio en la capacidad de la punta. Por lo tanto, la capacidad de carga de punta debe ser comparable a la de los pilotes de hélice continua (*Augered cast in place piles, ACIP*).

Los métodos de análisis específicos para pilotes DD fueron desarrollados por Bustamante y Ganeselli (1993-1998); NeSmith (2002); Basu y Prezzi (2009) y otros.

Nesmith (2002), evaluó los resultados de 28 pruebas de carga estática, como se muestra en la ~~Figura V-7~~ ~~Figura V-7~~ a la ~~Figura V-10~~ ~~Figura V-10~~, y desarrolló las siguientes

**Comentado [A27]:** Este documento NO está en la bibliografía.

**Comentado [A28R27]:** BUSTAMANTE, M. AND GIANESELLI L. (1993) Design of Auger Displacement Piles from In Situ Tests. *Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Proceedings of the Second International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, pp. 21-34.  
BUSTAMANTE, M. AND GIANESELLI L. (1998) Installation Parameters and Capacity of Screwed Piles. *Deep Foundations on Bored and Auger Piles. Proceedings of the Third International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, pp. 95-108

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

**Con formato:** No revisar la ortografía ni la gramática

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

**Con formato:** No revisar la ortografía ni la gramática

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

relaciones para pilotes DD en suelos no cohesión basadas en CPT o pruebas de penetración estándar (SPT) tomando en cuenta  $q_c < 19$  (MPa) ó  $N_{60} < 50$  (golpes/pie), respectivamente:

$$q'_n = 0.4q_c + w_t \leq q'_{n,max} \quad (1.6)$$

$$q'_n = 190N_{60} + w_t \leq q'_{n,max} \quad (1.7)$$

$$f_n = 0.01q_c + w_s \leq f_{n,max} \quad (1.8)$$

$$f_n = 5N_{60} + w_s \leq f_{n,max} \quad (1.9)$$

Donde:

$q'_n$  = Capacidad de carga nominal neta de punta (kPa).

$f_n$  = Capacidad de fricción lateral (kPa).

$q_c$  = Resistencia de cono (kPa).

$N_{60}$  = Número de golpes SPT (golpes/pie).

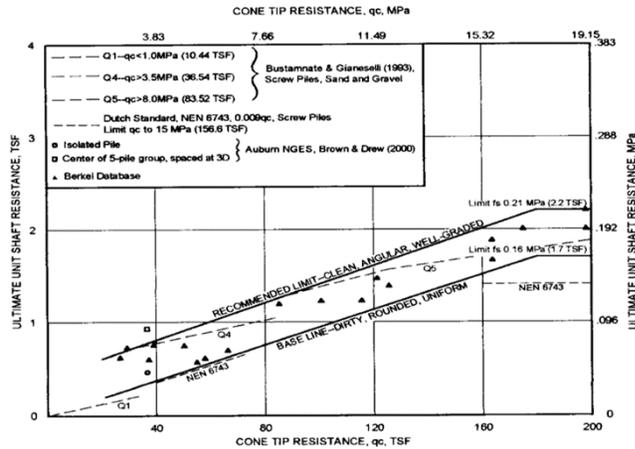


Figura V-7 Valores experimentales de  $f_s$  obtenidos de la prueba de carga en pilotes DD y resultados de CPT (NeSmith, 2002).

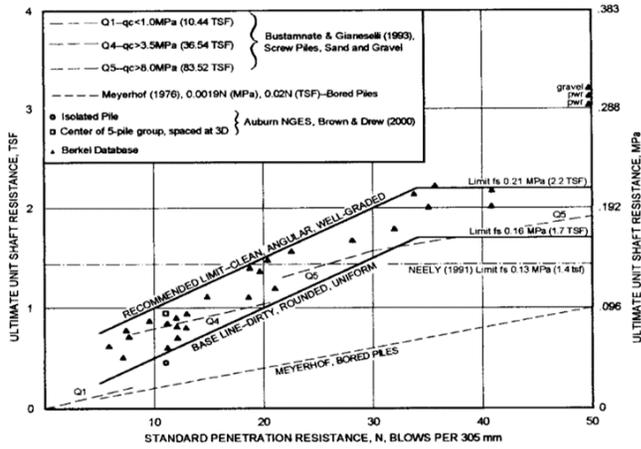


Figura V-8 Valores experimentales de  $f_s$  obtenidos de la prueba de carga en pilotes DD y resultados de SPT (NeSmith, 2002).

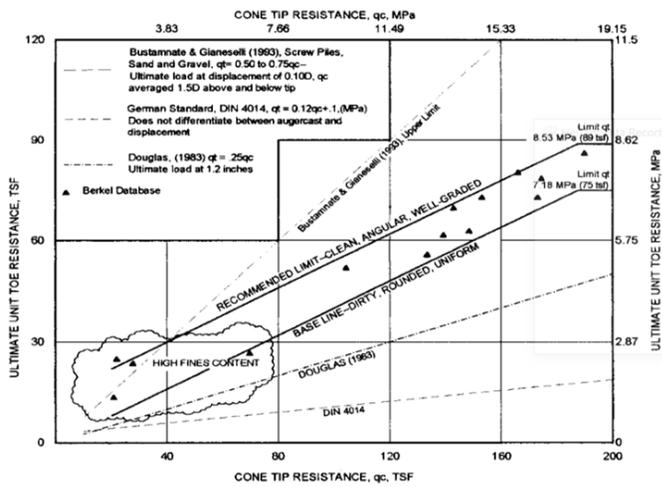


Figura V-9 Valores experimentales de  $q_t$  obtenidos de la prueba de carga en pilotes DD y resultados de CPT (NeSmith, 2002).

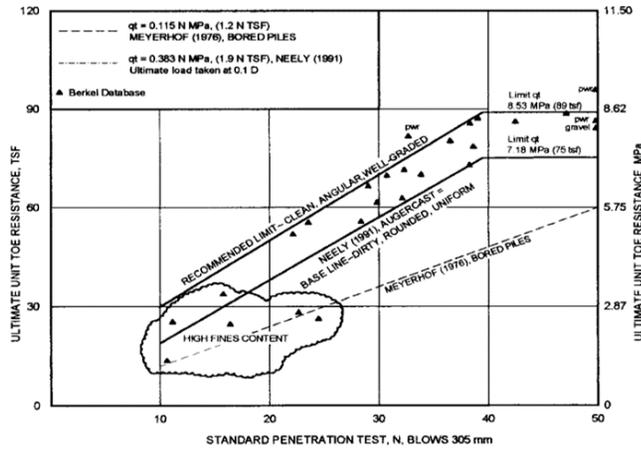


Figura V-10 Valores experimentales de  $q_t$  obtenidos de la prueba de carga en pilotes DD y resultados de SPT (NeSmith, 2002).

Los factores restantes se definen en la siguiente [Tabla V-3](#):

Tabla V-3 Factores de NeSmith (2002).

Tipo de Suelo	$w_t$ (kPa)	$w_s$ (kPa)	$q'_{n,max}$ (kPa)	$f_{n,max}$ (kPa)
Arena uniforme de grano redondeado con finos < 40%	0	0	7200	160
Arenas angulares bien graduadas con finos < 10 %	1340	50	8620	210

Los valores de  $q_c$  y  $N_{60}$  deben representar el suelo en la zona circundante para el análisis de capacidad por punta y el adyacente al pilote para el análisis de fricción lateral. Una vez más, los valores máximos se establecen independientemente del  $q_c$  o  $N_{60}$ .

#### V.4.3. Método de la EAP-DIN EN 12699 (2014)

A continuación, se estudia el método de análisis para pilotes perforados de desplazamiento total correspondientes a los pilotes Atlas los cuales se encuentran en la clasificación de los pilotes atornillados (*Screw Piles*) de acuerdo con la EAP-DIN EN 12699 (*Recommendations*

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Fuente: Sin Negrita

on Piling EA-Pfähle), metodología europea. El término "perforar" representa el aflojamiento y la extracción del suelo. La designación de pilote perforado de desplazamiento completo es, por lo tanto, algo contradictorio, ya que terminológicamente excavado y desplazamiento total son mutuamente excluyentes y podrían ser mal entendidos.

Para sistemas de pilotes en los que se cuenta con un tubo impulsor instalado estáticamente, es decir, rotado y/o presionado, libre de vibración, en particular en la zona de empotramiento el suelo está completamente desplazado, estos pilotes se conocen principalmente como Screw piles.

Los tubos de barrena de los pilotes perforados (*Screw piles*) son introducidos en el suelo sin impactos dinámicos. Por esta razón y debido al desplazamiento total, la profundidad de empotramiento de estos pilotes en estratos densos y duros es limitada. La ejecución de estos pilotes se encuentra descrita en la norma DIN EN 12699.

#### i) Valores empíricos de resistencia en la punta y fricción lateral

Los pilotes Atlas (*Screw piles*) son sistemas en los que el suelo está completamente desplazado. A continuación, se proporcionan datos empíricos de resistencia de punta y fricción lateral del pilote.

Cuando se especifique la resistencia media del cono  $q_c$  predominante del CPT o la resistencia característica al corte sin drenar  $c_{u,k}$ , la diferenciación se hará entre:

- La zona que gobierna la resistencia en la punta (de 1 diámetro por encima y de 4 diámetros por debajo de la punta del pilote).
- La zona que gobierna la fricción lateral es el valor medio del estrato en contacto.

Las condiciones para la aplicación de los valores de las ~~Tabla V-4~~ **Tabla V-4** y ~~Tabla V-5~~ **Tabla V-5** son:

- El espesor del estrato resistente debajo de la punta del pilote no debe ser inferior a tres diámetros, pero no menor a 1,50 m.
- $q_c \geq 7.5 \frac{MN}{m^2}$  ó  $c_{u,k} \geq 100 \frac{kN}{m^2}$  en esta zona. Independientemente de esto, es recomendable cimentar los pilotes en zonas donde  $q_c \geq 10 \frac{MN}{m^2}$ .

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Tabla V-4 Rango de datos empíricos para la resistencia característica de la punta  $q_{b,k}$  para pilotes Atlas en suelos no cohesivos.

Asentamiento relativo de la cabeza del pilote $s/D_s$	Resistencia de punta del pilote $q_{b,k}$ (kN/m <sup>2</sup> )		
	Resistencia de cono promedia CPT $q_c$ (MN/m <sup>2</sup> )		
	7.5	15	25
0.02	950-1400	1650-2300	2650-3450
0.03	1200-1850	2150-2950	3350-4450
0.1 (=s <sub>g</sub> )	2750-4000	4750-6500	6000-8000
Valores Intermedios deben ser interpolados linealmente.			

Tabla V-5 Rango de datos empíricos para la resistencia característica de la fricción lateral  $q_{s,k}$  para pilotes Atlas en suelos no cohesivos.

Resistencia de cono CPT promedio $q_c$ (MN/m <sup>2</sup> )	Valor del estado límite último de la fricción lateral $q_{s,k}$ (kN/m <sup>2</sup> )
7.5	85-105
15	160-200
>=25	200-245
Valores Intermedios deben ser interpolados linealmente.	

### V.5. Asentamiento del pilote aislado cargado axialmente

La mayoría de las cimentaciones profundas diseñadas tendrán asentamientos totales de no más de aproximadamente 12 mm (0.5 in), lo cual es aceptable para casi todas las estructuras. Sin embargo, en ciertas condiciones se pueden producir asentamientos excesivos, por lo que estos deben ser reconocidos y evaluados. Estos incluyen lo siguiente:

- La estructura es sensible especialmente a los asentamientos.
- La cimentación tiene un diámetro grande y una gran parte de la capacidad permitida es debido a la punta.
- Uno o más estratos altamente compresibles están presentes, especialmente si estos estratos están debajo de la punta.
- Cargas descendentes podrían desarrollarse durante la vida de la estructura.

### V.5.1. Método de Fellenius (1999)

La curva carga vs. asentamiento de una cimentación profunda se describe mediante las siguientes relaciones (Fellenius, 1999):

$$\frac{(q_t')_m}{q_t} = \left(\frac{\delta}{\delta_u}\right)^g \quad (1.10)$$

$$\frac{(f_s)_m}{f_s} = \left(\frac{\delta}{\delta_u}\right)^h \leq 1 \quad (1.11)$$

Donde:

- $q_t'$  = Resistencia de la capacidad en la punta unitaria.
- $(q_t')_m$  = Resistencia de la capacidad en la punta unitaria movilizada.
- $f_s$  = Resistencia de la fricción lateral unitaria.
- $(f_s)_m$  = Resistencia de la fricción lateral unitaria movilizada.
- $\delta$  = Asentamiento
- $\delta_u$  = Asentamiento requerido para movilizar la resistencia última.
  - = B/10 para la capacidad por punta.
  - = 10 mm (0.4 in) por fricción lateral
- $g$  = 0.5 (arcilla) y 1.0 (arena)
- $h$  = 0.02 – 0.5

Otra fuente de asentamiento es la compresión elástica. Se puede calcular usando:

$$\delta_e = \frac{Pz_c}{AE} \quad (1.12)$$

Donde:

- $\delta_e$  = Asentamiento debido a la compresión elástica de la cimentación.
- $P$  = Carga axial en la cimentación.
- $z_c$  = Profundidad al centroide de resistencia del suelo (típicamente alrededor 0.75D)
- $A$  = Área de la sección transversal
- $E$  = Módulo de elasticidad de la cimentación.
  - = 200000 (MPa) (para acero)
  - =  $4700\sqrt{f'_c}$  (MPa) (para concreto)

Las anteriores ecuaciones se utilizan para desarrollar las curvas carga vs. asentamiento.

### V.5.2. Función de transferencia hiperbólica Chin (1970)

#### V.5.2.1. Movilización de la capacidad del pilote

La curva de carga vs. asentamiento en la cabeza del pilote también puede evaluarse utilizando métodos de análisis estático.

Esta respuesta de carga vs. asentamiento es una composición del asentamiento requerido para movilizar la resistencia a la fricción lateral, el asentamiento requerido para movilizar la resistencia de la capacidad de punta, y la compresión elástica del pilote mismo. La desagregación de estos tres componentes proporciona más conocimiento sobre el comportamiento carga vs. asentamiento.

Asentamiento es el movimiento descendente en la parte superior del pilote, y el desplazamiento para describir el movimiento descendente en algún punto del pilote. La diferencia entre el desplazamiento a una profundidad dada y el asentamiento es la compresión elástica entre estos dos puntos.

#### i) Fricción lateral

La fricción lateral desarrollada en un segmento del pilote,  $fA_s$ , en un punto del pilote se asume como una función del desplazamiento  $\delta_z$ , el cual se describe mediante el modelo hiperbólico de Chin (1970).

$$fA_s = \frac{\delta_z}{K_s + \frac{\delta_z}{f_n A_s}} \quad (1.13)$$

Donde:

$f_n$  = Capacidad de fricción lateral unitaria nominal.

$f$  = Capacidad de resistencia por fricción lateral unitaria movilizada.

$A_s$  = Área de fricción lateral en contacto con el segmento del pilote.

El factor de flexibilidad de la resistencia lateral  $K_s$ , es la pendiente inicial de la curva  $f/f_n$  vs.  $\delta_z$ , mostrada en ~~Figura V-11~~ ~~Figura V-11~~. Está característica también puede definirse en términos del factor de flexibilidad  $M_s$ .

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

$$K_s = \frac{M_s B}{f_n A_s} \quad (1.14)$$

$M_s$  es un parámetro adimensional que normalmente varía desde 0.001 en suelos rígidos y duros a 0.004 en suelos suaves o sueltos. Caputo (2003), volvió a calcular  $M_s$  con una precisión de 0.001 a partir de 150 pruebas de carga y encontró que el 81% eran valores de 0.001 o 0.002. Valores tan bajos como 0.0005 podrían ser posibles en roca.

La solución de ecuación de  $fA_s$ , demuestra que un desplazamiento de 5-10 mm suele ser suficiente para movilizar el 90% de la capacidad de fricción lateral unitaria nominal  $f_n$ .

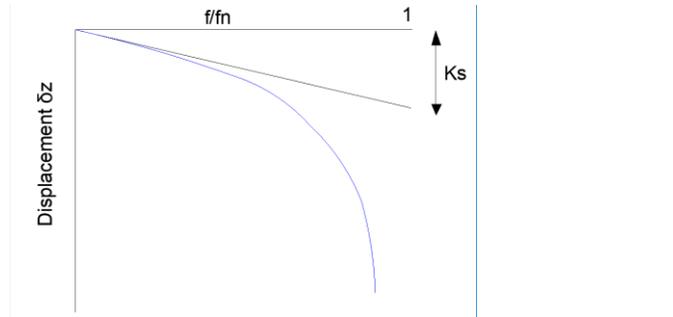


Figura V-11 Definición de  $K_s$ , factor de flexibilidad de resistencia lateral (De Cock, 2009).

## ii) Capacidad por punta

La capacidad por punta,  $q' A_t$ , se muestra como una función del desplazamiento por punta  $\delta_{punta}$ , el cual se puede describir con muy buena precisión utilizando el modelo hiperbólico de Chin (1970).

$$q' A_t = \frac{\delta_{punta}}{K_t + \frac{\delta_{punta}}{q_t A_s}} \quad (1.15)$$

Donde:

$K_t$  = Factor de flexibilidad de la resistencia por punta.

$q_t$  = Capacidad de resistencia por punta unitaria neta nominal.

$A_t$  = Área de la punta.

Comentado [A29]: No está en bibliografía.

Comentado [A30R29]: CAPUTO, V. (2003) Experimental Evidence for the Validation of Load – Settlement Predictions, *Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, pp. 205-300, W.F. Van Impe, Ed., Millpress, Rotterdam

Comentado [A31]: ¿de dónde viene esta figura?

Comentado [A32R31]: De Cock, 2009

El factor de flexibilidad de la resistencia por punta  $K_t$ , es la pendiente inicial de la curva  $q'-\delta_t$ . Esto también se puede definir en términos de  $E_{25}$ , el módulo secante del suelo dentro de la zona de influencia alrededor de la punta con un esfuerzo igual al 25%.

$$K_t = \frac{0.54}{E_{25}B} \quad (1.16)$$

Donde:

$E_{25}$  = Módulo secante del suelo.

$B$  = Diámetro del pilote.

De Cock (2009), también sugirió las siguientes relaciones para determinar  $E_{25}$  a partir del valor  $q_c$  del CPT, donde  $m$  es un coeficiente de correlación presentado en la [Tabla V-6](#) ~~Tabla V-6~~.

$$E_{25} = m q_c \quad (1.17)$$

Tabla V-6 Valores de  $m$  (De Cock, 2009).

Tipo de Suelo	Tipo de pilote	$m$
No cohesivo normalmente consolidado	Excavados	4-6
No cohesivo sobre-consolidado	Excavados	6-8
No cohesivo	Screw piles	8-12
No cohesivo	Pilotes hincados	15-20

La capacidad de carga de la punta unitaria nominal,  $q'_n$ , utilizado en análisis de capacidad estática define un asentamiento de  $0.1B$ . La capacidad de soporte de la punta en realidad es mayor, y este valor está definido como  $q'_p$ , utilizado en la definición de la curva hiperbólica carga vs. asentamiento.

Para los fines del análisis de asentamiento,  $q'_p$ , puede ser calculado de  $q'_n$ , utilizando la función hiperbólica para un asentamiento de  $0.1B$ :

$$q'_n A_t = \frac{0.1B}{K_t + \frac{0.1B}{q_p A_t}} \quad (1.18)$$

El asentamiento de la punta de  $0.1B$  requerido para movilizar la capacidad de carga de la punta  $q'_n$ , es mucho mayor que el requerido para movilizar la fricción lateral.

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Comentado [A33]: Favor ver tesis anteriores para el tema de cómo referenciar publicaciones.

Comentado [A34R33]: Esta referenciada de acuerdo a latex de Gutierrez

### V.5.3. Método EAP-DIN EN 12669 (2014)

Los elementos de la curva característica carga vs. asentamiento se muestra en la siguiente **!Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura V-12 para el asentamiento último donde  $s_{ult}=s_g$ .

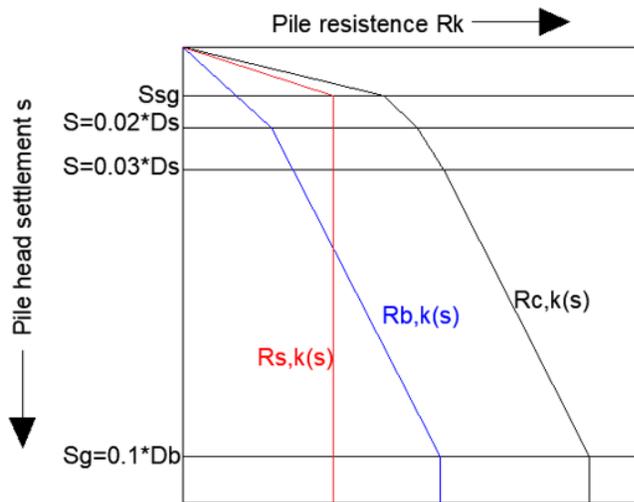


Figura V-12 Curva característica carga-asentamiento.  $R_{b,k}(s)$  resistencia por punta,  $R_{s,k}(s)$  resistencia por fuste y  $R_{c,k}(s)$  resistencia total del pilote.

Los asentamientos dependientes de la resistencia en la punta  $R_b(s)$  y la resistencia de fuste del pilote  $R_s(s)$  son diferenciados. El asentamiento límite se aplica en analogía a la siguiente ecuación para  $R_{b,k}$  ( $s_{ult} = s_g$ ):

$$s_g = 0.1D_b \quad (1.19)$$

Donde:

$D_b$  = Diámetro del pilote (m).

La variable de referencia que predomina para el asentamiento en el estado límite de servicio del fuste es el diámetro del pilote  $D_b$ .

El asentamiento límite se aplica a la resistencia característica del fuste del pilote  $R_{s,k}(s_{sg})$  en el estado último límite.

$$s_{sg}[cm] = 0.5R_{s,k}(s_{sg}) + 0.5 \leq 3[cm] \quad (1.20)$$

$R_{s,k}(s_{sg})$  = Resistencia característica del fuste.

$s_{sg}$  = Asentamiento límite dependiente de la resistencia del fuste característico.

Los elementos de la curva característica resistencia vs. asentamiento para pilotes hasta un asentamiento de  $s_{ult} = s_g$ , como se muestra en la [Figura V.12](#) ~~Figura V-12~~, son aplicables para pilotes roscados (*Screw piles*).

La resistencia característica a compresión del pilote  $R_{c,k}(s)$  se determina con la siguiente ecuación:

$$R_{c,k}(s) = R_{b,k}(s) + R_{s,k}(s) = q_{b,k}A_b + \sum_i q_{s,k,i}A_{s,i} \quad (1.21)$$

$A_b$  = Área de la punta del pilote.

$A_{s,i}$  = Área de la superficie del fuste del estrato  $i$ .

$q_{b,k}$  = Resistencia de la punta.

$q_{s,k,i}$  = Resistencia del fuste en el estrato  $i$ .

$R_{s,k}(s)$  = Resistencia característica de fuste.

$R_{b,k}(s)$  = Resistencia característica por punta.

$s_{sg}$  = Asentamiento límite para el asentamiento dependiente de la resistencia característica por fuste.

## V.6. Capacidad de carga lateral

Una cimentación profunda puede estar sometida a fuerzas horizontales producidas por los empujes de viento, fuerzas de la corriente de agua, fuerzas sísmicas, etc., estas fuerzas laterales son resistidas por la movilización de la presión pasiva del suelo circundante [Figura V.13](#) ~~Figura V-13~~.

La distribución de la reacción del suelo depende de la rigidez del pilote, la rigidez del suelo y la restricción en el extremo del pilote.

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

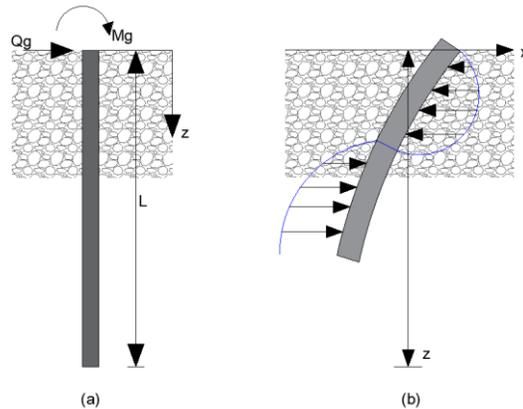


Figura V-13 Pilote cargado lateralmente b) Resistencia del suelo de un pilote cargado lateralmente (adaptada de Das, 2012).

Los pilotes cargados lateralmente se clasifican en:

- Pilotes cortos o rígidos.
- Pilotes largos o elásticos.

### V.6.1. Métodos de análisis de capacidad de carga horizontal

#### V.6.1.1. Método de Broms (1965)

##### i) Carga lateral última para pilotes en suelos no cohesivos

Para suelos cargados lateralmente (Broms, 1965) desarrolló una solución simplificada basada en dos modos de falla:

- Falla por corte en el suelo generalmente dada para pilotes cortos.
- Falla por flexión del pilote, que se rige por la resistencia a la fluencia plástica de la sección del pilote, que es aplicable para pilotes largos.

ii) **Pilote de longitud intermedia con rotación restringida en un suelo no cohesivo**

A medida que aumenta la longitud del pilote, se forma una zona plástica en la cabeza y el pilote rotará alrededor de un punto cuyo desplazamiento será nulo, tal como se muestra en la [Figura V-14](#).

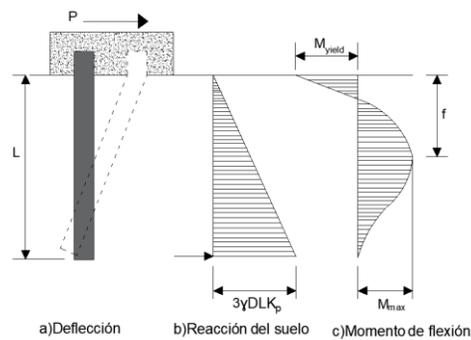


Figura V-14 Desplazamiento, reacción del suelo y momento flector para un pilote de longitud intermedia con rotación restringida (adaptada de Das, 2012).

Por consideraciones de equilibrio, la resistencia lateral última en la base de la cimentación se puede determinar de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$P_{\text{ult}} = \frac{M_y}{L} + 0.5\gamma bL^2 K_p \quad (1.22)$$

$$K_p = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (1.23)$$

Donde:

$M_y$  = Momento de fluencia del pilote.

$L$  = Longitud del pilote.

$\gamma$  = Peso específico del suelo.

$b$  = Diámetro del pilote.

$K_p$  = Coeficiente de empuje pasivo de Rankine

$\phi$  = Angulo de fricción del suelo.

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

iii) Pilotes largos con rotación restringida en suelos no cohesivos

El modo de falla se muestra en la [Figura V-15](#) ~~Figura V-15~~, teniendo lugar cuando se alcanza el momento flector límite en dos secciones del pilote convirtiendolo en un mecanismo.

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Fuente: Sin Negrita

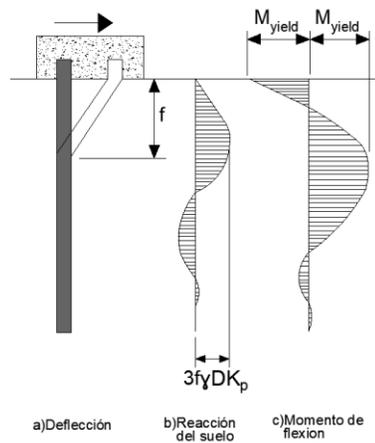


Figura V-15 Deformación, reacción del suelo y momento flector en un pilote largo sometido a cargas laterales en un suelo no cohesivo (Lymon C. Reese, 2001).

La distancia  $f$ , ubica la sección en la que el momento flector positivo es máximo, puede determinarse conociendo que el cortante es nulo en ese punto, y que toda la parte empotrada por encima de esta sección desarrolla la resistencia pasiva del estrato.

Entonces la resistencia lateral última se puede calcular como:

$$P_{tult} = \frac{M_{yield}^{pos} + M_{yield}^{neg}}{e + 0.54 \sqrt{\frac{P}{\gamma b K_p}}} \quad (1.24)$$

Donde:

$M_{yield}^{pos}$  y  $M_{yield}^{neg}$  = Resistencia límite de momento flector de las secciones en las que el momento positivo y negativo es máximo respectivamente.

$K_p$  = Coeficiente de empuje pasivo de Rankine.

Si el momento límite es el mismo en ambas secciones, entonces la ecuación se puede simplificar de la siguiente manera:

$$P_{\text{ult}} = \frac{2M_{\text{yield}}}{e+0.54\sqrt{\frac{P}{\gamma b K_p}}} \quad (1.25)$$

La solución de Broms (1965) para calcular la resistencia a carga última  $Q_{u(g)}$  para pilotes largos en arena se da en la [Figura V-16](#) ~~Figura V-16~~.

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Fuente: Sin Negrita

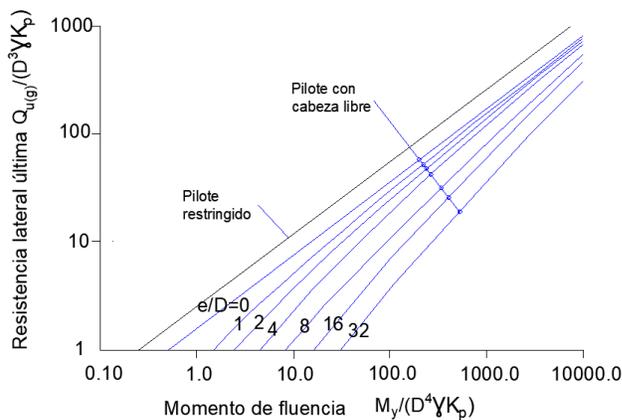


Figura V-16 Solución gráfica de Broms (1965) para el cálculo de  $Q_{u(g)}$ . (adaptada de Das, 2012).

#### iv) Efecto de la naturaleza de la carga en suelos no cohesivos

Broms (1965), observó que los pilotes instalados en suelos no cohesivos sufren la mayor parte de su deformación en el momento que se aplica inicialmente la carga. Bajo cargas sostenidas en el tiempo el efecto de la consolidación y el creep serán muy pequeños.

Para pilotes sometidos a cargas cíclicas, Broms (1965) recomendó en suelos no cohesivos de baja densidad relativa utilizar un coeficiente de balasto de  $1/4$  de su valor inicial, y de  $1/2$  de su valor inicial si la densidad relativa es alta. Sugirió también usar estas recomendaciones con precaución debido a la escasez de datos experimentales.

**v) Deformaciones en suelos no cohesivos**

Broms (1965) utilizó para el cálculo de desplazamientos en este tipo de suelos el método de coeficiente de balasto desarrollado por Terzaghi (1955), que considera para suelos no cohesivos que el coeficiente de balasto aumenta linealmente con la profundidad  $z$  y disminuye linealmente con el ancho  $b$  de la superficie cargada.

$$k_h = k_{py} \frac{z}{b} \quad (1.26)$$

Donde:

$k_{py}$  = Coeficiente de balasto horizontal de ancho unitario a una profundidad unitaria bajo la superficie del suelo. Por lo tanto, se asume que el coeficiente de balasto es independiente de la rigidez del pilote y de su longitud.

$b$  = Diámetro del pilote.

$z$  = Profundidad.

La deflexión de la cabeza del pilote al nivel de la superficie del suelo  $x_z(z=0)$ , en condiciones de carga de trabajo se puede estimar a partir de la **referencia**. El término  $\eta$  se puede expresar como:

$$\eta = \sqrt[5]{\frac{k_{py}}{E_p I_p}} \quad (1.27)$$

Donde:

$E_p$  = Módulo de elasticidad del material del pilote.

$I_p$  = Momento de Inercia de la sección del pilote.

El intervalo de  $k_{py}$  para un suelo granular se da en la siguiente **Tabla V-7**.

Tabla V-7 Valores de  $k_{py}$  recomendados (Terzaghi, 1955).

Densidad de la arena	$k_{py}$ (kN/m <sup>3</sup> )	
	Arena sumergida	Arena seca o húmeda
Suelto	1400	2500
Medio	4900	7400
Denso	12000	19000

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Comentado [A35]: Las tablas no deben ir con fondo de colores.

Borre el color azul de todas las tablas

Comentado [A36R35]: Borre el color azul de todas las tablas

Observese en la **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura V-17, donde:  $Q_g$  es la carga de trabajo.

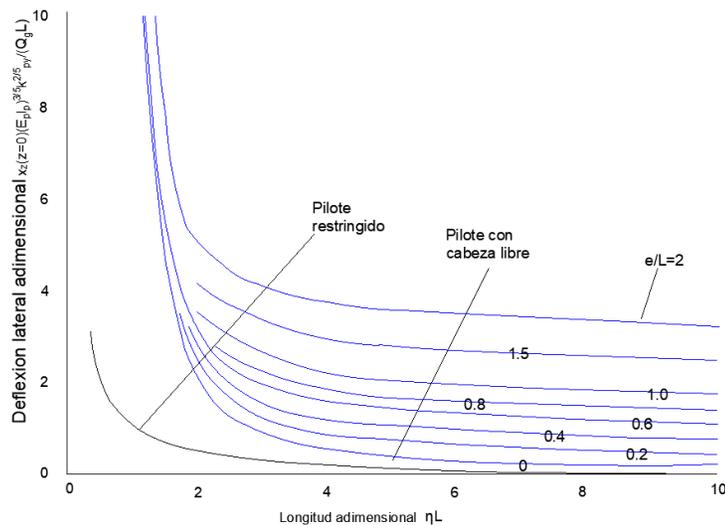


Figura V-17 Solución de Broms para estimar la deflexión de la cabeza de un pilote en arena (adaptada de Das, 2012).

Comentado [A37]: Revisar forma de citar.

Se puede apreciar que los pilotes cortos  $\eta L < 2$  se comportan como totalmente rígidos y los pilotes largos  $\eta L > 4$  se puede considerar infinitamente largos porque aumentar su longitud empotrada no se traduce en una disminución de los desplazamientos.

Para pilotes largos con la rotación restringida en la cabeza el desplazamiento es:

$$y_0 = \frac{0.93 Q_g}{K_{py}^{3/5} (E_p I_p)^{2/5}} \quad (1.28)$$

Donde:

$Q_g$  = Carga horizontal aplicada al nivel del suelo.

$E_p$  = Módulo de elasticidad del material del pilote.

$I_p$  = Momento de Inercia de la sección del pilote.

#### V.6.1.2. Método elástico de Reese (1984)

Este método resuelve la ecuación de la elástica según Reese (1984). La ecuación diferencial que gobierna el análisis es la siguiente:

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + 4\beta^4 y = 0 \quad (1.29)$$

$$\beta^4 = \frac{k_h D}{4E_p I_p} \quad (1.30)$$

Reese (1984) considera el coeficiente de reacción horizontal  $k_h$  constante con la profundidad. El Manual de Carreteras (2018) presenta la siguiente ecuación:

$$k_h = \frac{0.9 E_s}{D} \quad (1.31)$$

Donde:

$E_p$  = Módulo de elasticidad del pilote.

$I_p$  = Momento de inercia del pilote.

$E_s$  = Módulo de elasticidad del suelo.

$y$  = Deformación horizontal del pilote.

$x$  = Profundidad.

$D$  = Diámetro del pilote.

Las deformaciones y los momentos se definen mediante las siguientes ecuaciones:

$$y = A_1 \frac{Q_g \beta}{k_h D} \quad (1.32)$$

$$S = D_1 \frac{Q_g}{E_p I_p \beta^2} \quad (1.33)$$

$$M = -B_1 \frac{Q_g}{2\beta} \quad (1.34)$$

$$V = C_1 Q_g \quad (1.35)$$

$$p = -A_1 Q_g \beta \quad (1.36)$$

Donde:

$Q_g$  = Carga lateral.

$k_h$  = Coeficiente de reacción horizontal.

$D$  = Diámetro del pilote.

$A_1$   $B_1$   $C_1$  y  $D_1$  = Coeficiente adimensional.

Los coeficientes  $A_1$   $B_1$   $C_1$  y  $D_1$  pueden ser evaluados para diferentes condiciones de borde, las fórmulas que se muestran a continuación utilizan una condición de pilote restringido al giro en la cabeza.

$$A_1 = e^{-\beta z}(\cos \beta z + \sin \beta z) \quad (1.37)$$

$$B_1 = e^{-\beta z}(\cos \beta z - \sin \beta z) \quad (1.38)$$

$$C_1 = e^{-\beta z}(\cos \beta z) \quad (1.39)$$

$$D_1 = e^{-\beta z}(\sin \beta z) \quad (1.40)$$

El Manual de Carreteras (2018) entrega ábacos que permiten obtener los valores de los coeficientes sin resolver las ecuaciones diferenciales.

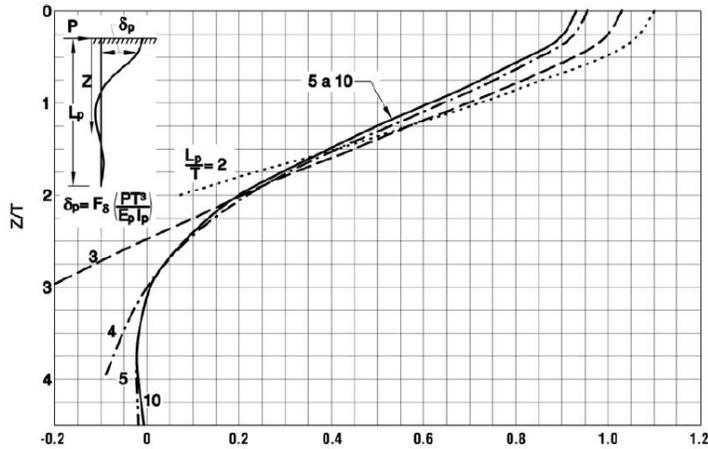


Figura V-18 Coeficiente de desplazamiento para una fuerza horizontal (Manual de Carreteras, 2018).

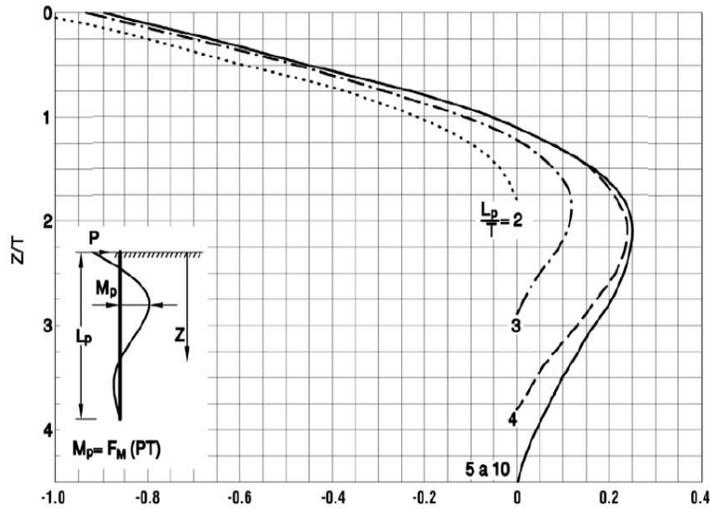


Figura V-19 Coeficiente de momento para la fuerza horizontal (Manual de Carreteras, 2018).

#### V.6.1.3. Método de Matlock y Reese (1960)

Esta solución fue propuesta por Matlock y Reese (1960), donde se propone un método para determinar los momentos y deformaciones de un pilote empotrado en un suelo granular sometido a una carga lateral en el extremo del pilote.

El modelo del coeficiente de balasto fue propuesto inicialmente por Winkler (1867), un medio elástico como el suelo, se puede reemplazar por una serie de resortes elásticos independientes cercanos entre sí.

Con base en esta hipótesis tenemos:

$$k = -\frac{p}{y} \quad (1.41)$$

Donde:

k = Módulo de reacción del suelo multiplicado por el diámetro del pilote (kN/m<sup>2</sup>).

p = Presión del suelo (kN/m).

y = Deflexión (m).

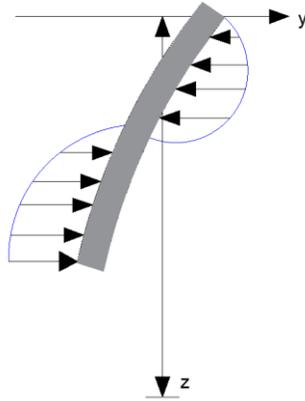


Figura V-20 Reacción del suelo (adaptada de Das, 2012).

El módulo del subsuelo para suelos granulares a una profundidad específica fue definida por Matlock y Reese (1960) como:

$$k = k_{py}z \quad (1.42)$$

Donde:

$k_{py}$  = Constante del módulo de reacción horizontal del subsuelo.

$z$  = Profundidad.

Tabla V-8 Coeficientes de ajuste para pilotes largos  $k=k_{py}z$  (Das, 2012).

Suelo	$k_{py}$ (kN/m <sup>3</sup> )
<b>Arena seca o húmeda</b>	
Suelta	1800-2200
Media	5500-7000
Densa	15000-18000
<b>Arena sumergida</b>	
Suelta	1000-1400
Media	3500-4500
Densa	9000-12000

Utilizando la teoría de vigas sobre una cimentación elástica, la distribución de presiones se puede escribir como:

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dz^4} = p \quad (1.43)$$

Donde:

$E_p$  = Módulo de elasticidad del material de pilote.

$I_p$  = Momento de inercia de la sección transversal del pilote.

Según el modelo de Winkler:

$$p = -ky \quad (1.44)$$

El signo negativo se debe a que la reacción del suelo está en la dirección opuesta a la deflexión del pilote. Al combinar las dos ecuaciones anteriores, se obtiene la siguiente expresión:

$$E_p I_p \frac{d^4 x}{dz^4} + kx = 0 \quad (1.45)$$

Matlock y Reese (1962) resolvieron la ecuación diferencial usando el método de las diferencias finitas, y propusieron las siguientes expresiones para pilotes cortos y largos:

**i) Cabeza del pilote con rotación impedida (empotrado).**

- Deflexión del pilote a cualquier profundidad  $y(z)$ .

$$y(z) = A_x \frac{Q_g T^3}{E_p I_p} + B_x \frac{M_g T^2}{E_p I_p} \quad (1.46)$$

- Pendiente del pilote a cualquier profundidad  $\theta(z)$ .

$$\theta(z) = A_\theta \frac{Q_g T^2}{E_p I_p} + B_\theta \frac{M_g T}{E_p I_p} \quad (1.47)$$

- Momento del pilote a cualquier profundidad  $M(z)$ .

$$M(z) = A_m Q_g T + B_m M_g \quad (1.48)$$

- Fuerza cortante a cualquier profundidad  $V(z)$ .

$$V(z) = A_v Q_g + B_v \frac{M_g}{T} \quad (1.49)$$

- Reacción del suelo a cualquier profundidad  $p(z)$ .

$$p(z) = A_p \frac{Q_g}{T} + B_p \frac{M_g}{T^2} \quad (1.50)$$

La longitud característica del sistema suelo-pilote se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{k_{py}}} \quad (1.51)$$

Dónde:

$A_x, B_x, A_m, B_m, A_v, B_v, A_p$  y  $B_p$  = Coeficientes de ajuste

$Q_g$  = Carga lateral.

$M_g$  = Momento

$F_y$  y  $F_m$  = Coeficientes de ajuste para la condición empotrada.

$T$  = Longitud característica del sistema suelo pilote.

Esta formulación no toma en cuenta la no linealidad del comportamiento del suelo. De aquí se considera:

$L \geq 5T$  Pilote largo elástico.

$L \leq 2T$  Pilote corto o rígido.

El coeficiente de ajuste para la condición de cabeza empotrada se muestra en la siguiente

[Figura V-21](#) ~~Figura V-21.~~

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Fuente: Sin Negrita

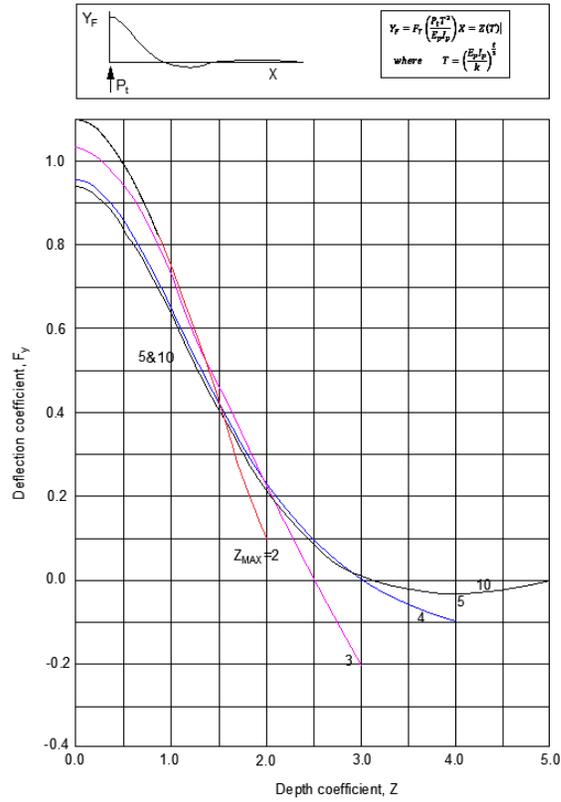


Figura V-21 Deflexión en pilotes para la condición de cabeza empotrada (adaptada de Matlock y Reese, 1960).

Tabla V-9 Variación de coeficiente Fm.

Fm	Zmax
-1.06	2
-0.97	3
-0.93	>=4

#### V.6.1.4. Método no lineal curvas p-y

Para incorporar la no linealidad, Reese (2001) determinó que la presión varía de manera no lineal con el desplazamiento  $y$ .

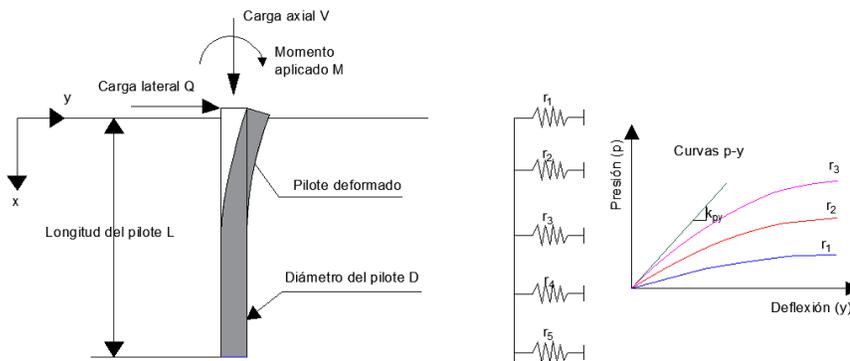


Figura V-22 Modelo analítico utilizado en el método no lineal p-y.

Idealmente, las curvas p-y deberían obtenerse ensayando pilotes a escala real en el terreno donde se requiera instalar. En ausencia de estos ensayos, es posible utilizar las curvas p-y que varios autores han propuesto para distintos tipos de suelos basándose en datos empíricos. Reese y Van Impe (2001) propusieron unas curvas denominadas p-y para analizar pilotes bajo carga lateral cuando están instalados en estratos arenosos. Las curvas p-y propuestas derivaron de pruebas de campo llevadas a cabo en pilotes tubulares de 0.610 m. La forma típica derivada por estos autores tanto para cargas estáticas como para cargas cíclicas se muestran en la [Figura V-23](#). Se puede observar en esta gráfica que tiene en la parte inicial un tramo lineal con pendiente  $k_{py}$ . Está pendiente suele denominarse por algunos autores como el módulo horizontal de subrasante.

Luego la curva tiene una relación no lineal hasta una deflexión lateral de  $b/60$  donde  $b$  es el diámetro del pilote. Para niveles de deflexión entre  $b/60$  y  $3b/80$ , la curva p-y vuelve a ser lineal. La reacción del suelo llega a su valor último  $P_u$  a una deflexión de  $3b/80$  y de ahí en adelante se asume que la curva p-y no aumenta y se mantiene constante en un valor  $p_u$ .

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

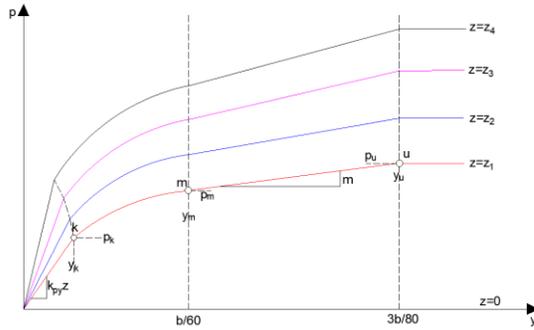


Figura V-23 Forma característica de la curva p-y en arenas. (adaptada de Reese y Van Impe, 2001).

Al solucionar la ecuación (1.45) por el método de las diferencias finitas, de acuerdo a los puntos de integración en profundidad se obtienen sus respectivas curvas p-y. Esta formulación supone el comportamiento del suelo a cierta profundidad e independiente del comportamiento del suelo a otras profundidades.

Los pasos para generar las curvas p-y para arenas por encima y por debajo del nivel freático para cargas estáticas y cíclicas son los siguientes:

1. Para generar la curva p-y de una arena a una profundidad dada, es necesario conocer los siguientes valores:
  - $\phi$  = Ángulo de fricción del suelo.
  - $\gamma$  = Peso específico boyante del terreno sumergido si la arena está por debajo del nivel freático y peso específico total si está por encima.
2. Realizar los siguientes cálculos preliminares:

$$\alpha = \frac{\phi}{2} \quad (1.52)$$

$$\beta = 45 + \frac{\phi}{2} \quad (1.53)$$

$$K_o = 0.4 \quad (1.54)$$

$$K_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (1.55)$$

3. La resistencia lateral última del suelo ubicado cercano a la superficie se obtiene mediante el cálculo de la fuerza total que actúa contra la porción superior del pilote, diferenciando los resultados con respecto a “z”.

La expresión utilizada para estimar la capacidad última del suelo por unidad de longitud del pilote es la siguiente:

$$P_{st} = \gamma z \left[ \frac{K_o z \tan \phi \sin \beta}{\tan(\beta - \phi) \cos \alpha_s} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} (b + z \tan \beta \tan \alpha) + K_o z \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) - K_a b \right] \quad (1.56)$$

$$P_{st} = K_a b \gamma z (\tan^3 \beta - 1) + K_o b \gamma z \tan \phi \tan^4 \beta \quad (1.57)$$

Donde:

b = Diámetro del pilote.

z = Profundidad donde se determina la resistencia última del suelo.

$K_o$  = Coeficiente de empuje en reposo =  $1 - \sin \phi$

$K_a$  = Coeficiente de empuje activo =  $(1 - \sin \phi) / (1 + \sin \phi)$

$\alpha$  = Ángulo característico para arenas ( $\phi/2$  para arenas sueltas y  $\phi/3$  para arenas densas).

4. Establecer  $y_u = 3b/80$ . Calcular la resistencia última del suelo por unidad de pilote tomando en cuenta la siguiente ecuación:

$$p_{ult} = \bar{A}_s p_s \quad (1.58)$$

$$p_{ult} = \bar{A}_c p_s \quad (1.59)$$

Usar el valor apropiado de  $\bar{A}_s$  y  $\bar{A}_c$  de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.Figura V-24**Figura V-24, además utilizar el valor apropiado de  $p_s$  con referencia al paso 3.

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

**Con formato:** No revisar la ortografía ni la gramática

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

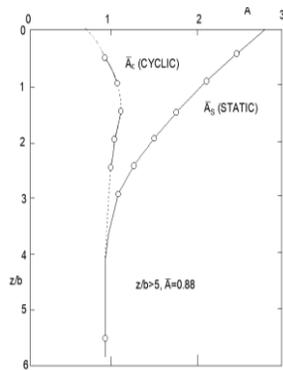


Figura V-24 Valor de los coeficientes de  $\bar{A}_s$  y  $\bar{A}_c$  (adaptada de Van Impe, 2001).

5. Establecer  $y_m = b/60$ . Calcular  $p_m$  de la siguiente ecuación:

$$p_m = \bar{B}_s p_s \quad (1.60)$$

$$p_m = \bar{B}_c p_s \quad (1.61)$$

Usar el valor apropiado de  $\bar{B}_s$  y  $\bar{B}_c$ , de la ~~Figura V-25~~ ~~Figura V-25~~, para para la profundidad particular adimensional ya sea para el caso estático o cíclico. Usar la ecuación apropiada para el cálculo de  $p_s$ .

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

**Con formato:** No revisar la ortografía ni la gramática

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

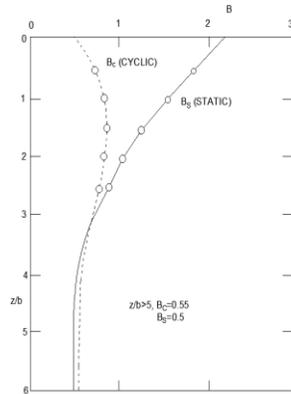


Figura V-25 Valor de los coeficientes adimensionales de  $\bar{B}_s$  y  $\bar{B}_c$  (adaptada de Reese y Van Impe, 2001)

6. Establecer la porción parabólica de la curva que se encuentra entre los puntos m y u con las siguientes ecuaciones:

$$p = (k_{py}z)y \quad (1.62)$$

Usar los valores apropiados de la [Tabla V-10](#) ~~Tabla V-10~~:

Tabla V-10 Valores de  $k_{py}$  representativos para arenas.

Densidad de la arena	$k_{py}$ (MN/m <sup>3</sup> )	
	Arena sumergida	Arena por encima del NF.
Suelto	5.4	6.8
Medio	16.3	24.4
Denso	34	61

7. Establecer la sección parabólica de la curva p-y.

$$p = \bar{C} y^{\frac{1}{n}} \quad (1.63)$$

Ajustar la parábola entre los puntos k y m como sigue:

- a. Obtener la pendiente de la línea entre los puntos m y u por:

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

$$m = \frac{p_u - p_m}{y_u - y_m} \quad (1.64)$$

b. Obtener la potencia de la sección parabólica por:

$$n = \frac{p_m}{m y_m} \quad (1.65)$$

c. Obtener el coeficiente  $\bar{C}$  como sigue:

$$\bar{C} = \frac{p_m}{\frac{1}{y_m^n}} \quad (1.66)$$

d. Determinar el punto k como:

$$y_k = \left( \frac{\bar{C}}{k_{pyz}} \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad (1.67)$$

e. Calcular un numero apropiado de puntos de la parábola usando la ecuación del punto 7.

#### V.6.1.5. Método Evans y Duncan (1982)

Evans y Duncan (1982) desarrollaron un método que permite demostrar el comportamiento de la deflexión de una carga lateral de forma gráfica. Ellos compilaron estas gráficas de una serie de análisis del método p-y usando el programa COM 624.

Las ventajas de estas gráficas incluyen lo siguiente:

- El análisis se puede realizar más rápido, y estos no requieren el uso de una computadora.
- Las cargas correspondientes a la deflexión de un pilote pueden ser determinadas directamente, en lugar de realizar pruebas.

Estos gráficos presentados aquí son un subconjunto del método original y aplicado solo a cimentaciones profundas que satisfacen los siguientes criterios:

- La rigidez, EI, es constante a lo largo de la cimentación.
- El esfuerzo cortante del suelo, expresada como  $s_u$  ó  $\phi'$  y el peso específico  $\gamma$ , son constantes con la profundidad.

- La cimentación es suficientemente profunda como para considerarla empotrada en el extremo inferior. Para cimentaciones relativamente rígidas, como las de acero o concreto, la longitud debe ser al menos 35 diámetros.

**i) Carga y momento característico**

Evans y Duncan (1982), definen la carga característica de corte  $V_c$ , y el momento característico  $M_c$  mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_c = \lambda B^2 E R_I \left( \frac{\sigma_p}{E R_I} \right)^m (\epsilon_{50})^n \quad (1.68)$$

$$M_c = \lambda B^3 E R_I \left( \frac{\sigma_p}{E R_I} \right)^m (\epsilon_{50})^n \quad (1.69)$$

$$R_I = \frac{1}{\frac{\pi B^4}{64}} \quad (1.70)$$

$$\sigma_p = 2C_{p\phi} \gamma B \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (1.71)$$

Donde:

- $R_I$  = 1.00 si la sección transversal es circular.  
= 1.70 si la sección transversal es cuadrada.
- $\lambda$  = 1.00 para arenas
- $V_c$  = Carga de corte característico.
- $M_c$  = Momento característico.
- $\lambda$  = Parámetro adimensional dependiente del comportamiento esfuerzo deformación del suelo.
- $B$  = Diámetro del pilote.
- $E$  = Módulo de elasticidad de la fundación.  
= 200000 (MPa) para acero.  
=  $4700\sqrt{f'_c}$  (MPa) para concreto.
- $f'_c$  = Resistencia a la compresión del concreto a los 28 días.
- $R_I$  = Relación del momento de inercia (adimensional).
- $\sigma_p$  = Presión pasiva representativa del suelo.

$\epsilon_{50}$  = Deformación axial a la cual el 50 % de la resistencia del suelo es movilizada. [Tabla V-11](#)

$m, n$  = exponentes de la [Tabla V-12](#)

$I$  = Momento de inercia de la cimentación.  
 $= \pi B^4/64$  para sección transversal circular.  
 $= B^4/12$  para sección cuadrada.

$\phi'$  = Ángulo de fricción efectivo del suelo desde la superficie del suelo hasta una profundidad de 8 veces el diámetro del pilote.

$C_{p\phi}$  = Factor de presión pasiva =  $\phi'/10$

$\gamma$  = Peso específico de la superficie del suelo a una profundidad de 8 veces el diámetro del pilote. Si el nivel freático está en esta zona, usar el promedio de  $\gamma$  y  $\gamma_b$ , donde:  $\gamma_b = \gamma - \gamma_w$  (el peso específico boyante en esta zona bajo el nivel freático).

El valor de  $\epsilon_{50}$  podría ser determinado el ensayo de compresión triaxial. Sin embargo, cuando estos datos de prueba no están disponibles se usan los valores mostrados en la [Tabla V-11](#).

Tabla V-11 Valor típico de  $\epsilon_{50}$  (Reese and Wang, 1997).

Tipo de Suelo	$\epsilon_{50}$
Arena media, densa	0.002

Tabla V-12 Valores de exponente  $m$  y  $n$  (Evans and Duncan, 1982).

Tipo de Suelo	Para $V_c$		Para $M_c$	
	$m$	$n$	$m$	$n$
Arena	0.57	-0.22	0.4	-0.15

## ii) Gráficas de Evans y Duncan (1982)

Las siguientes gráficas muestran la relación entre el corte, momento y la deflexión, donde:

$V$  = Corte aplicado en la parte superior de la cimentación.

$M$  = Momento aplicado en la parte superior de la cimentación.

$M_{max}$  = Momento máximo en la cimentación.

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Comentado [A38]: En texto aparece símbolo distinto.

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Comentado [A39]: En texto aparece símbolo distinto.

$y_t$  = Deflexión lateral en la parte superior de la cimentación.

Algunas cimentaciones están sujetas a ambas cargas de corte y momento. Como primera aproximación es posible, el cálculo de la deflexión lateral y el momento de cada componente por separado.

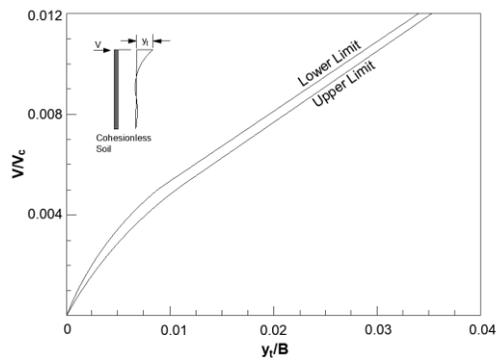
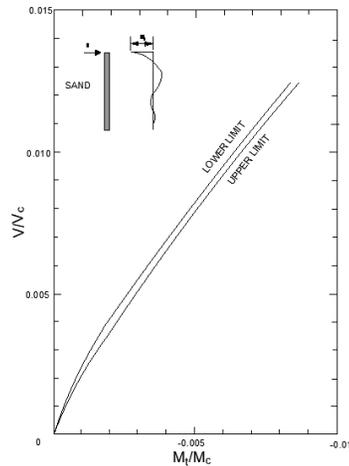


Figura V-26 Curvas de carga de corte vs. deflexión lateral para condiciones de empotramiento en la arena (adaptada de Evans and Duncan, 1982).



**Figura V-27** Curva de Carga de corte vs. momento máximo para condiciones de empotramiento en arenas (adaptada de Evans and Duncan, [1982])

## VI. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

### VI.1. Prueba de carga

Las pruebas de carga se realizan para determinar a escala natural el comportamiento cimentación-suelo y de esta forma reducir los costos de construcción.

Los objetivos que se persiguen con las pruebas de carga son los siguientes:

- Determinar la capacidad de carga axial de pilotes apoyados en estratos más resistentes.
- Definir confiablemente la longitud necesaria de los pilotes de fricción.
- Ensayar el procedimiento constructivo con el que se proyecta fabricar los pilotes.

Esta prueba trata de definir el comportamiento pilote-suelo cuando se somete a una secuencia de cargas axiales que simulan las que transmitirá la estructura.

#### VI.1.1. Criterio de carga controlada

**Comentado [A40]:** Comentario general. Si bien es muy interesante, usar el 50% del documento para una los distintorevisión de s métodos de cálculo es demasiado. Esto debería quedar reducido, de ser posible, a cerca de un tercio.

**Comentado [A41R40]:** La parte teórica explica cada método de la manera mas resumida, de la anterior revisión a esta reduje mucho, usted me podría decir que considera no importante en el texto para reducirlo un poco mas.

El marco teórico esta un poco extenso tb por los gráficos, y toca dos temas capacidad de carga vertical y capacidad de carga lateral.

Este tipo de carga es el más extensamente aplicado; permite definir la carga última que soporta un pilote aplicando la carga en incrementos y siguiendo alguno de los siguientes criterios:

- Aplicar incrementos iguales de carga, cuando la rapidez de asentamiento medida en la cabeza del pilote, se reduzca a un valor mínimo.
- Aplicar incrementos iguales de carga en incrementos de tiempo constantes.

#### VI.1.1.1. Rapidez de asentamiento mínimo

Los incrementos de carga se aplican cuando la rapidez de asentamiento generada por el incremento previo de carga se haya reducido a un valor mínimo preestablecido, usualmente de 0.25 mm/h, 0.01 in/h (ASTM D 1143-81); en cuanto a la magnitud de los incrementos de carga, se acostumbra que sean del 25% de la capacidad de carga de diseño.

Durante la realización de la prueba, en cada incremento de carga se debe comprobar que la rapidez de asentamiento se ha reducido al valor mínimo preestablecido, como se muestra en la [Figura VI-1](#), corresponde a un tramo de la gráfica de control paralelo a la línea de referencia.

La carga máxima a la que se lleva la prueba es de por lo menos dos veces la carga de diseño que se mantiene por 2 horas para después proceder a la etapa de descarga en decrementos que pueden ser del orden de 0.25Qmax (carga máxima) a cada 20 min [Figura VI-2](#), la recuperación del asentamiento se mide a los 5, 15 y 30 min después de haber retirado totalmente la carga, o si es posible, durante más tiempo.

La información obtenida en la etapa de carga se muestra esquemáticamente en la [Figura VI-3](#).

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

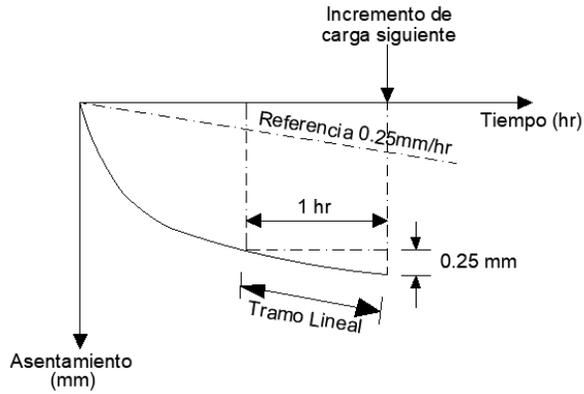


Figura VI-1 Control de la prueba (adaptada de Manual de cimentaciones profundas SMMS, 2001).

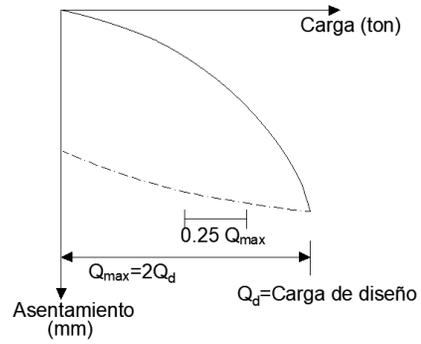


Figura VI-2 Etapa de carga (adaptada de Manual de cimentaciones profundas SMMS, 2001)

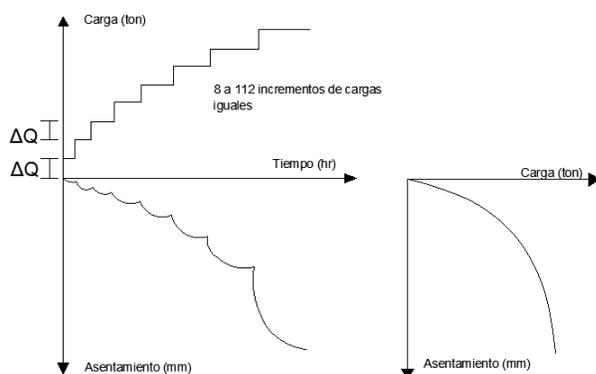


Figura VI-3 Resultados de la prueba de carga (adaptada de Manual de cimentaciones profundas SMMS, 2001)

#### VI.1.1.2. Incrementos de tiempo constantes

En esta prueba los incrementos iguales de carga se aplican a intervalos de tiempo constantes, usualmente de 15 min (RSAES, 1908); la magnitud convencional de los mismos es de 5% de la capacidad de carga última del pilote.

La norma ASTM D 1143-81 propone un tiempo límite de 2 horas entre incrementos de carga.

La información que se obtiene de esta prueba es similar a la [Figura VI-3](#).

#### VI.1.2. Instalación para una prueba de carga estática

La instalación para una prueba de carga debe diseñarse de acuerdo con el tipo de prueba que se va a realizar, para alcanzar de manera segura los niveles de carga y deformación previstos, con un grado de precisión admisible; asimismo, su diseño debe permitir llevar un control confiable del desarrollo de la prueba y el registro de la información suficiente para la interpretación posterior.

Para realizar la prueba se requiere los siguientes elementos de instalación:

- Sistema de reacción
- Equipo de aplicación de carga
- Dispositivos de medición

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Revisar la ortografía y la gramática

#### VI.1.2.1. Sistema de reacción

El sistema de reacción consiste esencialmente de un puente formado por una o varias vigas, que pueden tener sus extremos anclados, con el cual se da el apoyo necesario al equipo de carga, este sistema debe ser estable y seguro en todo momento, cuidando que las cargas que transmite al suelo no influyan en el comportamiento del pilote de prueba. Este sistema de reacción empleado es denominado pilotes de anclaje.

Para absorber la reacción se pueden seguir dos criterios: utilizar pilotes inclinados o verticales, la primera solución es más recomendable porque se reduce la interacción entre los pilotes de reacción y el de prueba.

Este sistema es más económico ya que se pueden aprovechar como anclaje los pilotes que formarán parte de la cimentación; en este caso deben estar correctamente alineados para que no existan excentricidades en la carga.

Comúnmente se usan de 2 a 4 pilotes de anclaje dependiendo de la magnitud de la carga por aplicar, en todo caso, la separación recomendable al pilote de prueba es de 10 diámetros y la mínima admisible es de 5 diámetros.

Con este criterio de reacción la interacción entre los pilotes es más significativa conforme se alcanzan niveles altos de la carga.

#### VI.1.2.2. Equipo de aplicación de la carga

La carga se puede aplicar al pilote de prueba mediante un sistema hidráulico de presión que se coloca entre las vigas de reacción y el pilote, en cuyo caso la reacción proviene de las piezas ancladas. Este sistema permite controlar fácilmente los niveles de carga previstos si se consideran los siguientes aspectos:

- El sistema hidráulico de carga debe contar con un mecanismo que regule el movimiento del pistón para mantener una carga constante conforme se asiente el pilote o para permitir una rapidez de deformación uniforme, dependiendo del tipo de prueba que se realice Weeks y Dixon (1974).
- La longitud del pistón debe ser mayor que los asentamientos que sufrirá el pilote.
- Sobre el pistón debe mantenerse un apoyo esférico, que facilita la alineación y elimina la transmisión de momentos al pilote.

- La carga se transmite al pilote con una placa horizontal de acero adherida con mortero a la cabeza del elemento.

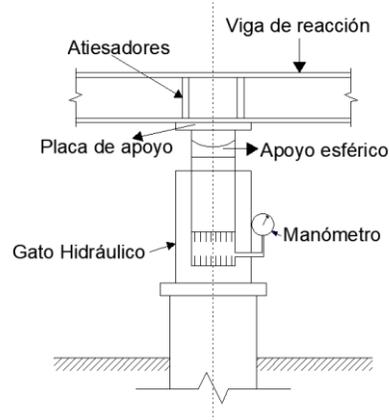


Figura VI-4 Sistema Hidráulico, equipo de aplicación de carga (adaptada de Manual de cimentaciones profundas SMMS, 2001)

### VI.1.2.3. Dispositivos de medición

Las variables que deben medirse durante la prueba de capacidad de carga son las siguientes:

- Los asentamientos que sufren los pilotes en la cabeza, las cargas aplicadas y los tiempos en que ocurren.

Los dispositivos que se utilizan para determinar las variables mencionadas se detallan a continuación:

- **De la carga.** La magnitud de la carga aplicada se puede evaluar con un manómetro calibrado o con una celda electrónica.
- **De los asentamientos.** Los asentamientos que sufre el pilote de prueba se deben medir con un sistema preciso y confiable, generalmente se utilizan micrómetros entre el pilote y un marco de referencia fijo. Además, es necesario usar un segundo sistema de medición, que aunque sea de menor precisión, permita tener una referencia adicional y controlar visualmente la prueba. Este segundo sistema de medición puede ser una escala graduada adherida al pilote, que se observa con un nivel topográfico.

## VI.2. Pilotes de desplazamiento total DD

El sistema que se describe a continuación es un pilote de desplazamiento total (*Full displacement piles*) inyectado a presión. La herramienta de desplazamiento para este sistema se muestra en la ~~Figura VI-5~~ y la plataforma de instalación se muestra en la ~~Figura VI-6~~.



**Post-Densificación durante la extracción**  
Hélice de rotación contraria del cuerpo cónico para la densificación de las áreas sueltas del suelo durante la extracción de la herramienta.

**Estabilización**  
El cuerpo cilíndrico de desplazamiento para estabilizar el material del suelo desplazado.

**Densificación**  
La forma cónica del vástago hueco induce fuerzas horizontales en el suelo transportadas hacia arriba por las hélices.

**Aflojamiento**  
El suelo es aflojado por el arranque de la sección del barreno y transportado hacia arriba por medio de las hélices.

Figura VI-5 Herramienta de desplazamiento (Bauer, 2018).

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

**Con formato:** No revisar la ortografía ni la gramática

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

**Con formato:** No revisar la ortografía ni la gramática

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

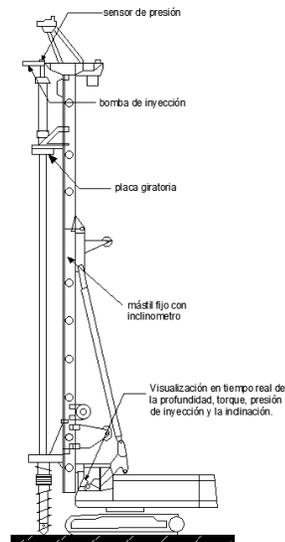


Figura VI-6 Plataforma de instalación (adaptada de NeSmith 2002).

Actualmente, existen herramientas disponibles que van desde 0,31 m hasta 0,46 m de diámetro. La sección del barreno suele tener aproximadamente 0,9 m de longitud y puede ser variable según la aplicación.

La plataforma de instalación incluye un mástil vertical con una placa giratoria adjunta capaz de producir un torque de 25 ton-m, y un sistema de cableado que permite transmitir una fuerza de 40 ton, a las herramientas. El equipo actual permite llegar a una profundidad máxima de 24 m.

A medida que avanza la herramienta, el material penetrado se desplaza horizontalmente y se comprime. La profundidad de la punta es visualizada en el compartimiento del operador, y cuando se alcanza el nivel de punta necesario, se detiene el avance del elemento y se inicia la inyección del hormigón través de un tubo central.

Cuando se alcanza la presión objetivo en la inyección, se inicia la extracción de la herramienta. La velocidad de extracción varía para mantener la presión de inyección adecuada.

Para una aplicación típica en materiales granulares sueltos a medios, las presiones objetivo de instalación generalmente estarán en el rango de 138 a 207 kPa (20 a 30 psi) para el arranque y de 69 a 103 kPa (10 a 15 psi) para la construcción del fuste.

El volumen de concreto inyectado se controla de la misma manera que se realiza en los pilotes de hélice continua APG (*Auger Pressure Grouted*).

La herramienta gira durante la extracción y cualquier material que pueda haber ingresado al espacio anular entre el vástago y el diámetro completo de la perforación es capturado por las hélices inversas y forzado a regresar a las paredes de la perforación.

La perforación y extracción se vuelven difíciles en resistencias de punta de cono  $q_c$  de aproximadamente 14 MPa y muy difícil a 19 MPa por lo que se los establece como valores límite.

El barreno colmado de suelo y el elemento de desplazamiento actúan como un compactador, y la inyección está limitado bajo el nivel de la herramienta de desplazamiento, [Figura VI-7](#).

[VI-7](#) ~~Figura VI-7.~~

La presión de inyección es medida en la parte superior del vástago, que esta por lo general 24.4 metros sobre la punta del elemento de desplazamiento.

Las hélices inversas capturan cualquier material que pueda haber entrado entre el vástago y la pared del pilote. Este material es desplazado lateralmente otra vez antes de la inyección.

La presión de la inyección en la punta incluye rangos de 690 kPa (100 psi) al arrancamiento y 621 kPa (90 psi) durante la instalación del pilote.



La presión objetivo medida de arrancamiento es 138 kPa (20 psi) a 270 kPa (30 psi). La presión objetivo medida durante la construcción de la pila es de 69 kPa (10 psi) a 103 kPa (15 psi).

La barrena llena con suelo y el elemento de desplazamiento, actua como un compactador para confinar la inyección.

Figura VI-7 Presiones de instalación de la inyección de concreto (adaptada de NeSmith, 2002).

A medida que la herramienta se acerca a la superficie, se disminuye la presión de inyección, y se puede detener el bombeo en un punto anterior a la salida de la herramienta del suelo.

La posición operativa básica podría ser el pilote vaciado por tremie, y que la sobrepresión (es decir, la presión detectada por el transductor en la parte superior de las herramientas) es un mecanismo para garantizar que haya un flujo de inyección adecuado a través de cada segmento del pilote, independientemente del material penetrado.

Con una tasa constante de extracción, las presiones de inyección eran altas en las arenas densas, y caían cuando la herramienta atravesaba estratos de arenas o materiales sueltos de grano fino.

Además de la visualización en tiempo real de la profundidad, la presión de inyección del concreto y el torque, se produce un registro permanente de cada instalación.

El espacio requerido entre los pilotes para impedir la interacción es una función de los materiales del subsuelo que se están penetrando. Se han instalado pilotes de hasta 3 diámetros de centro a centro en arenas limpias medias a sueltas sin interacción detectable. Se requiere un espaciamiento mayor cuando hay materiales granulares sucios saturados o materiales de grano fino saturado en el perfil, con un espacio de hasta 12 diámetros de centro a centro del pilote. Un espaciamiento de 6 diámetros de centro a centro del pilote es típico. En resumen, la secuencia de operación es la siguiente:

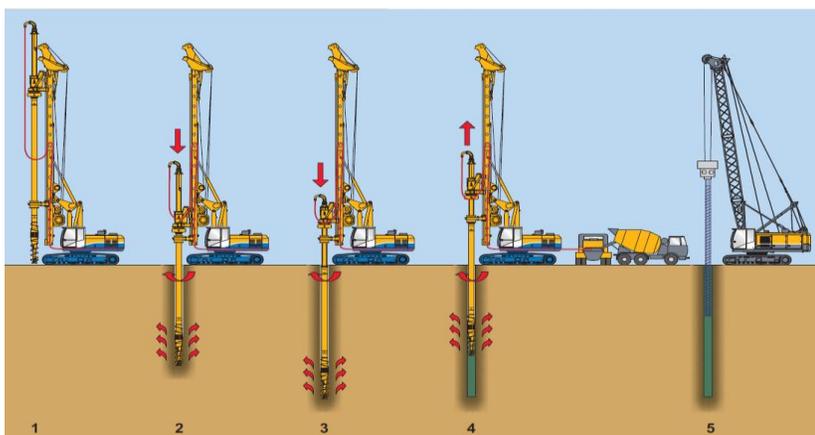


Figura VI-8 Pasos de instalación pilote de desplazamiento total DD (Bauer, 2013).

1. Posicionamiento y configuración de la plataforma de perforación para la ejecución del pilote.
2. Perforación de la herramienta de desplazamiento en el suelo por rotación y empuje de la herramienta. El suelo se afloja inicialmente por el arranque del barreno y posteriormente el material circundante es empujado radialmente por el cuerpo de la barrena.
3. Perforación hasta la profundidad final. La profundidad de instalación está limitada por la altura del mástil de perforación, pero puede ser extendido entre 6 y 10 metros, dependiendo del tipo de la plataforma.
4. Al alcanzar la profundidad final, la herramienta de desplazamiento es extraído y el hormigón se bombea simultáneamente a través del vástago hueco hacia el vacío creado por la herramienta. Durante la extracción, la herramienta de desplazamiento gira en la dirección de perforación y densifica cualquier material que pudiera haber caído en el orificio o en las áreas de las paredes aflojadas del pozo con la sección de vuelo contraria por encima del cuerpo desplazador.
5. La armadura de refuerzo estructural se empuja hacia el interior del hormigón.

### VI.3. Pilotes perforados de desplazamiento total (Atlas pile)

El pilote Atlas es un pilote perforado de hormigón, de desplazamiento y vaciado in situ (De Cock y Imbo, 1994). El desplazamiento lateral del suelo ocurre tanto durante la perforación como la extracción de la barrena (esta es la razón por la que se llama pilote de doble desplazamiento). Estos pilotes son instalados utilizando una plataforma de perforación especialmente diseñada con una base de transmisión giratoria (Bottiau, 2006).

El equipo tiene dos cilindros hidráulicos que pueden funcionar de manera independiente (un cilindro reemplaza al otro después de alcanzar su carrera completa) para permitir una operación de perforación continua. En el caso de suelos duros, los dos cilindros hidráulicos se pueden usar simultáneamente. El equipo se puede operar a velocidades de rotación duales. Esto ayuda a controlar la tasa de penetración de la herramienta de perforación en diferentes tipos de suelos. Una punta de sacrificio está unida al cuerpo de desplazamiento que, a su vez, está unido a la camisa de acero de acuerdo a la [Figura VI.9](#).

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

El cuerpo de desplazamiento consiste en una cabeza helicoidal desmontable de hierro conectado con una hélice helicoidal. La junta entre el cuerpo de desplazamiento y la punta del sacrificio es hermética. La acción combinada del par de rotación y la fuerza de empuje vertical de la camisa hacia el suelo con un movimiento penetrante helicoidal y continuo, en sentido horario. Después de alcanzar la profundidad deseada, el azuche de acero se separa de la camisa girando la misma en sentido antihorario (abriendo así la conexión entre el azuche de acero y la camisa). Después, la armadura de acero se inserta en la camisa, y el concreto se vierte a través de una tolva colocada en la parte superior de la carcasa para vaciar el fuste del pilote. Como la camisa y el cuerpo de desplazamiento se extraen mediante una fuerza de tracción vertical y en sentido de rotación antihorario, el concreto llena completamente la perforación helicoidal formado por el movimiento ascendente de la rosca de desplazamiento. De esta manera, se forma un fuste con forma de rosca y varía según el procedimiento de extracción (De Cock e Imbo, 1994).

El diámetro del cuerpo de desplazamiento (que es mismo que el diámetro mínimo del fuste) típicamente varía de 0.31 m a 0.56 m, mientras que el de la hélice helicoidal varía de 0.45 m a 0.81 m (Bustamante y Gianceselli, 1998; De Cock e Imbo, 1994).

La longitud de los pilotes Atlas puede alcanzar hasta 22-25 m de profundidad.

Las resistencias características de los pilotes en el estado límite de servicio son del orden de 0.5 MN a 1.7 MN, dependiendo de las condiciones del suelo y el diámetro del pilote.

En resumen, la secuencia de operación es la siguiente:

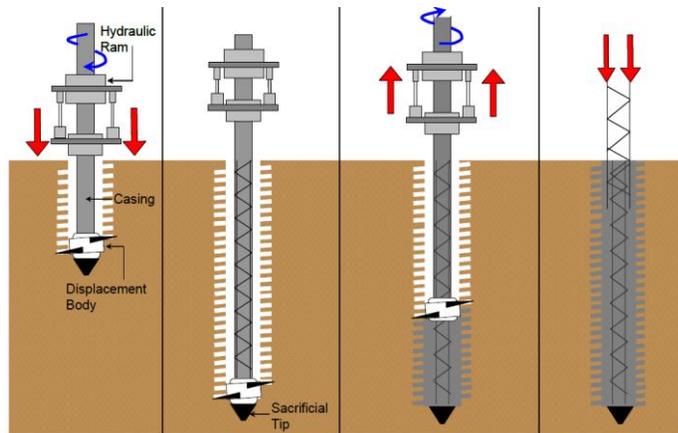


Figura VI-9 Pasos de instalación pilote de desplazamiento Atlas (Mónica Prezzi, 2005).

1. Perforación de la barrena en sentido horario y aplicación de la fuerza vertical.
2. Inserción de la armadura de refuerzo hasta el final de la perforación.
3. Extracción de la camisa de acero con rotación en sentido antihorario y aplicación de la fuerza vertical en tracción.
4. Inserción de una armadura suplementaria por lo que el pilote Atlas con fuste de forma de rosca queda completo.

## VII. METODOLOGÍA

### VII.1. Problema de estudio

En la zona Norte de la ciudad de Santa Cruz – Bolivia se construyeron dos módulos para la Universidad Privada del Valle mediante cimentación profunda. La obra se encuentra emplazada en suelos de origen aluvial con una distribución de estratos heterogénea y con un nivel freático poco profundo ubicado aproximadamente a 1 metro de la superficie.

El proyecto consta de dos módulos que serán utilizados para el rectorado y la sala de computación respectivamente. Se realizó la construcción de 208 pilotes para el módulo del rectorado y 165 pilotes para el módulo de la sala de computación sienten un total de 373 pilotes, ejecutados mediante el sistema de desplazamiento total. Esta tecnología es más eficiente respecto a los sistemas convencionales utilizados para la ejecución de pilotes.

La empresa Terra Foundation S.A., realizó ensayos de carga a cinco pilotes de prueba construidos en los predios de la Universidad Privada del Valle mediante el sistema de desplazamiento total (*Full Displacement Piles*) para verificar la capacidad de carga de los pilotes que forman parte de los encepados de los módulos.

A partir de estas pruebas de carga se estudió el comportamiento carga vs. asentamiento en arenas de baja capacidad. Las curvas experimentales resultantes de los ensayos realizados a escala real fueron comparadas con las curvas obtenidas mediante los métodos analíticos de Eslami y Fellenius (1997), NeSmith (2002) y el método descrito en la EAP-DIN EN 12699 (2014).

Inicialmente se realizaron dos ensayos SPT hasta una profundidad de 30 metros, para conocer la resistencia a la penetración en función del número de golpes, los valores obtenidos de SPT se correlacionaron a valores CPT mediante los factores detallados en la Tabla V.1, lo que permitió caracterizar la estratigrafía discretizada cada 1 m en el Software AXPILE GGU.

Los ensayos de investigación analizaron el comportamiento de cinco pilotes de prueba de un mismo diámetro y distinta longitud. A partir de esta curva carga vs. asentamiento experimental se procedió a la comparación con las curvas generadas por los métodos analíticos anteriormente mencionados.

**Comentado [A42]:** Debes comenzar por describir el proyecto para el que se usarán los pilotes. Luego describir la geología y geotecnia del lugar. Después, describir los ensayos propiamente tal. Después vienen la comparación crítica entre los modelos y lo medido.

**Comentado [A43R42]:** En el problema de estudio se describe el proyecto y también se incluyó la geología en Bolivia donde se emplazara el proyecto

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto

**Con formato:** Fuente: Times New Roman

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, Sin Negrita

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, No revisar la ortografía ni la gramática

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, Sin Negrita

Las características geométricas y las coordenadas de ubicación de los pilotes de prueba son las siguientes:

Tabla VII-1 Dimensiones y coordenadas de los pilotes de prueba.

N° Pilote	Diámetro (m)	Longitud (m)	Coordenadas	
			Latitud	Longitud
P1	0.36	-13.75	481432.00	8040520.00
P2	0.36	-10.30	481446.00	8040526.00
P3	0.36	-10.70	481495.00	8040511.00
P4	0.36	-7.70	481552.00	8040397.00
P5	0.36	-11.90	481527.00	8040396.00

## VII.2. Consideraciones Geológicas

La geología local del sector responde a lineamientos geomorfológicos (estudio de las formas del relieve), es decir que en su conformación estratigráfica existen unas secuencias sedimentarias de origen continental conformado por estratos irregulares de arcilla de plasticidad variable con limos arenosos, formaciones debidas a rellenos hidráulicos típicas de las llanuras del Chaco - Beniana. Desde el punto de vista geológico el área estudiada pertenece a la Llanura Chaco - Beniana. En esta llanura las estructuras son suaves y amplias, están formadas íntegramente por rocas terciarias. La topografía es plana con ondulaciones suaves.

La llanura Chaco – Beniana está constituida por sedimentos fluvio lacustres originados en el subandino y el Escudo Chiquitano, acarreados y depositados por los diferentes ríos y quebradas que surcaron la llanura hace mucho tiempo atrás.

Los suelos están formados por sedimentos aluviales del cuaternario los cuales dieron origen a las llanuras aluviales y de inundación antigua. Son suelos jóvenes con poco desarrollo podogenético y con superposición de estratos de diferentes tipos de tamaños.

De acuerdo con el relevamiento geológico de superficie, conjuntamente a la lectura de las muestras obtenidas, los suelos que predominan los estratos son suelos granulares finos.

Según el muestreo se tiene la presencia de arenas limosas cuya proporción y gradación son variables, con presencia en toda el área de proyecto.

La infiltración de aguas en estos suelos, sumada a un flujo de turbulenta podría determinar el lavado y arrastre de las partículas de limo, lo cual origina un reacomodamiento de sus componentes granulares que muchas veces se traducen en fenómenos de asentamiento, cuyas magnitudes son generalmente impredecibles y difíciles de cuantificar.



Figura VII-1 Mapa geológico de Bolivia.

### VII.3. Estratigrafía

De acuerdo con los antecedentes geotécnicos se define el perfil estratigráfico de la zona de emplazamiento del proyecto.

En la ~~Figura VII-2~~ ~~Figura VII-2~~ se muestra la ubicación de los ensayos SPT y la posición de los pilotes de prueba para el ensayo de capacidad de carga de acuerdo a las coordenadas geográficas ~~Tabla VII.2~~ ~~Tabla VII-2~~.

- Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro
- Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto
- Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Revisar la ortografía y la gramática
- Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto
- Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Revisar la ortografía y la gramática



Figura VII-2 Ubicación de los ensayos SPT y los pilotes de prueba en la zona de estudio (Google Earth).

Tabla VII-2 Coordenadas geográficas de los ensayos SPT y los pilotes de prueba.

	Longitud (m)	Coordenadas geográficas.	
		Latitud	Longitud
SPT1	30	481432.00	8040520.00
SPT2	30	481446.00	8040526.00
P1		481432.00	8040520.00
P2		481446.00	8040526.00
P3		481495.00	8040511.00
P4		481552.00	8040397.00
P5		481527.00	8040396.00

La exploración consistió en 2 sondajes SPT (*Standard Penetration Test*), de 30 metros de profundidad. En la Tabla VII-3 se presentan los resultados de los ensayos SPT, los valores se correlacionaron mediante los factores de la Tabla V-1 y se obtuvieron los valores de resistencia  $q_c$  (MPa) CPT (*Cone Penetration Test*).

Tabla VII-3 Parámetros geotécnicos de la estratigrafía.

SPT1				
	Clasif.	SPT	CPT	Densidad Suelo
Prof.	S.U.C.S	N (golpes/pie)	$q_c$ (Mpa)	$\gamma_a$ (ton/m3)
1	SP-SM	4	0.81	1.85
2	SP-SM	4	0.81	1.85
3	SP-SM	2	0.41	1.80
4	SP-SM	2	1.01	1.80
5	SP	11	5.57	1.80
6	SP	11	2.23	1.96
7	SP	14	7.09	1.96
8	SM	18	9.11	1.96
9	SM	25	12.66	1.90
10	SM	29	14.68	1.90
11	SM	18	7.20	1.90
12	SP-SM	22	8.80	1.99
13	SP-SM	24	9.60	1.99
14	SP	28	11.20	1.98
15	SP	35	14.00	1.98
16	SP	37	14.80	1.98
17	SP	40	16.00	1.98
18	SP-SM	42	16.80	1.99
19	SP-SM	44	17.60	1.99
20	CL	34	6.80	1.70
21	CL	25	5.00	1.70
22	SM	24	9.60	2.00
23	CL	23	4.60	1.73
24	CL	20	4.00	1.73
25	CL	15	3.00	1.73
26	ML	27	5.40	1.81
27	SP-SM	15	6.00	2.01
28	CL	17	3.40	1.73
29	CL	15	3.00	1.73
30	CL	22	4.40	1.73

SPT2				
	Clasif.	SPT	CPT	Densidad Suelo
Prof.	S.U.C.S	N (golpes/pie)	$q_c$ (Mpa)	$\gamma_a$ (ton/m3)
1	SC-SM	2	1.0	1.80
2	SC-SM	3	1.0	1.85
3	SP-SM	6	0.6	1.97
4	SP-SM	5	2.0	1.97
5	SP-SM	7	2.4	1.97
6	SP	6	2.0	1.96
7	SP	12	6.6	1.96
8	ML	23	8.6	1.81
9	ML	21	8.6	1.81
10	SP-SM	19	15.2	1.99
11	SP-SM	20	8.0	1.99
12	SP-SM	25	10.0	1.99
13	SP-SM	26	10.4	1.99
14	SP-SM	30	12.0	1.99
15	SP-SM	38	15.2	1.99
16	SP	40	16.0	1.98
17	SP	41	16.4	1.98
18	SP	43	17.2	1.98
19	SP	45	18.0	1.98
20	CL	32	6.4	1.70
21	CL	23	4.6	1.70
22	SM	23	9.2	2.00
23	CL	21	4.2	1.73
24	CL	21	4.2	1.73
25	CL	14	2.8	1.73
26	CL	25	5.0	1.73
27	SP-SM	13	5.2	2.01
28	CL	15	3.0	1.73
29	CL	13	2.6	1.73
30	CL	19	3.8	1.73

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

A continuación, se muestran los perfiles SPT (*Standard Penetration Test*) y CPT (*Cone Penetration Test*):

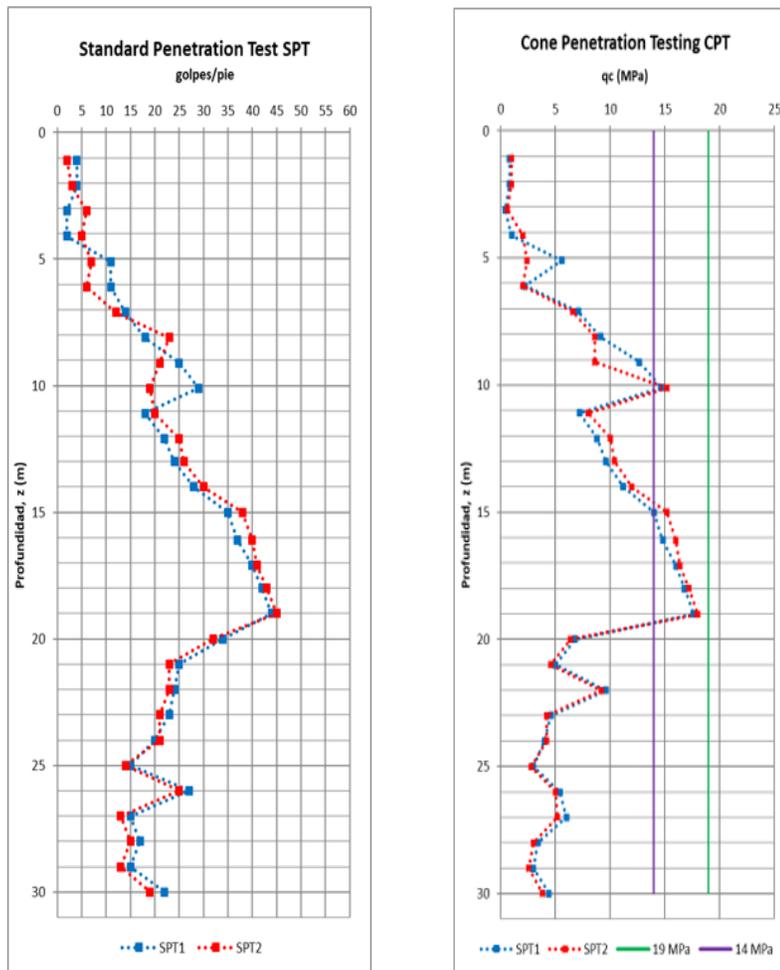


Figura VII-3 a. Perfil SPT (golpes/pie), b) Perfil CPT  $q_c$  (MPa) correlacionado.

Comentado [A44]: Eliminar el fondo de color de las tablas.

## VII.4. Pilote cargado axialmente

En este apartado, se describen las consideraciones y los parámetros empleados en los análisis para la obtención de las curvas carga vs. asentamiento.

### VII.4.1. Método experimental

#### VII.4.1.1. Ensayo capacidad de carga

##### a) Estructura de ensayo

Se realizaron cinco ensayos de carga a la compresión como se muestra en la [Figura VII.4](#). La estructura del ensayo estuvo compuesta por una viga metálica de reacción, bajo la cual se apoyó el gato hidráulico para comprimir el pilote de prueba. La viga metálica reaccionó sobre las barras (pernos) que están embebidos, a cada extremo se tienen dos pilotes de reacción los cuales tomaron la carga de prueba del ensayo a tracción por fuste. La viga se posicionó de forma que el pilote P1, P2, P3, P4 y P5 ensayados de forma individual estuvieron ubicados en el centro de su luz. Esta viga de reacción se diseñó para una carga máxima admisible mayor a la carga prevista.

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Revisar la ortografía y la gramática

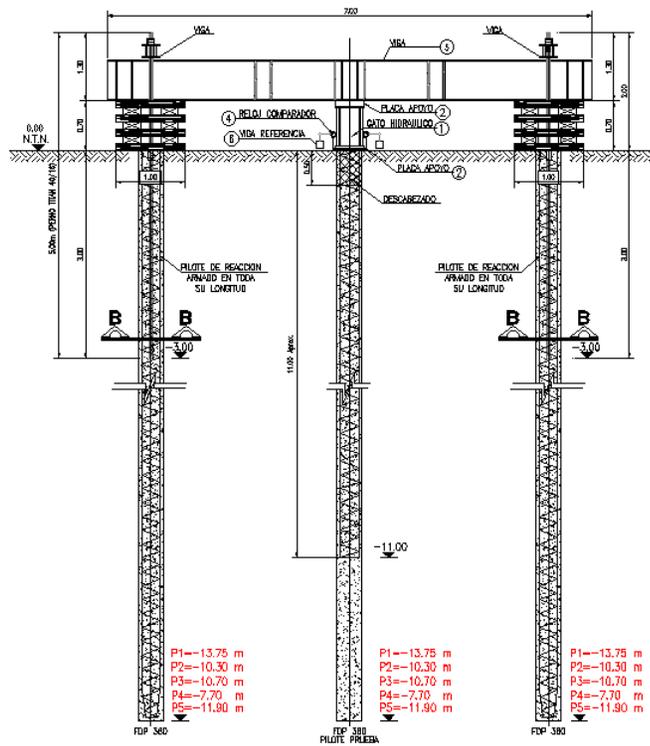


Figura VII-4 Corte longitudinal del ensayo a distintos sellos de fundación.

A continuación, en la [Figura VII-5](#), se muestra la vista en planta de la disposición de los ensayos de prueba de carga realizados in situ.

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Revisar la ortografía y la gramática

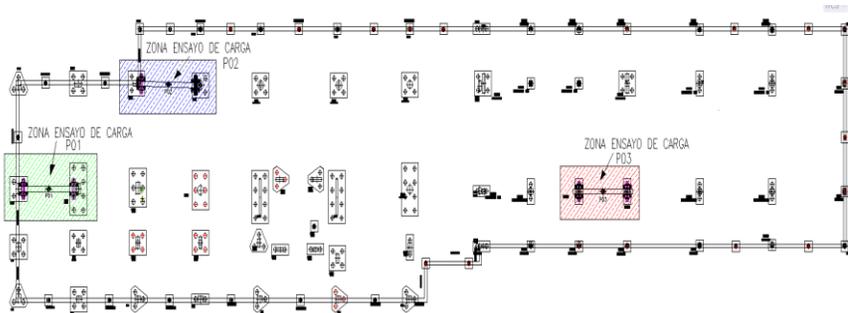


Figura VII-5 Vista en planta de los ensayos de carga P1, P2 y P3 en el módulo del rectorado.

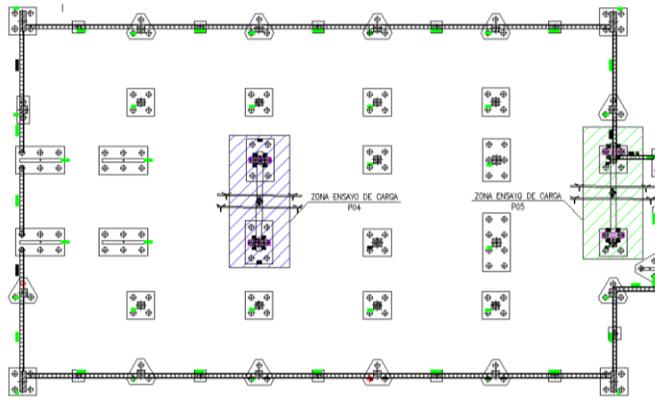


Figura VII-6 Vista en planta de los ensayos de carga P4 y P5 en el módulo de la sala de computación.

En la ~~Figura VII-7~~~~Figura VII-7~~, ~~Figura VII-8~~~~Figura VII-8~~, ~~Figura VII-9~~~~Figura VII-9~~, ~~Figura VII-10~~~~Figura VII-10~~ y ~~Figura VII-11~~~~Figura VII-11~~ se muestran las vistas en planta de los pilotes de prueba P1, P2, P3, P4 y P5 y los pilotes de reacción correspondientes a cada ensayo.

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

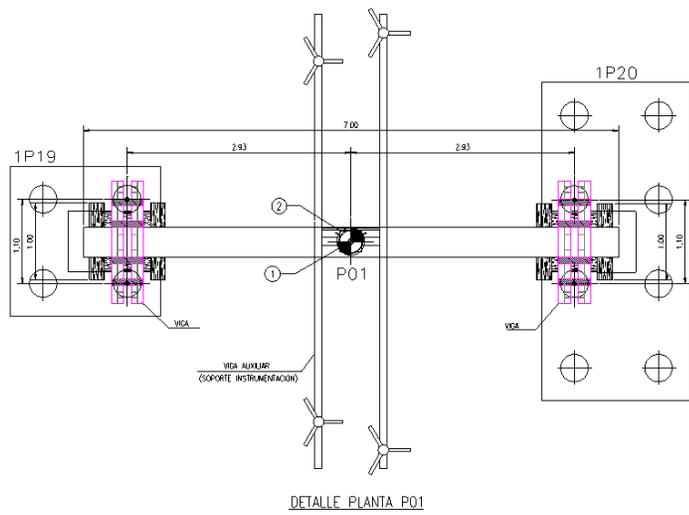


Figura VII-7 Vista en planta del ensayo de carga del pilote de prueba P1.

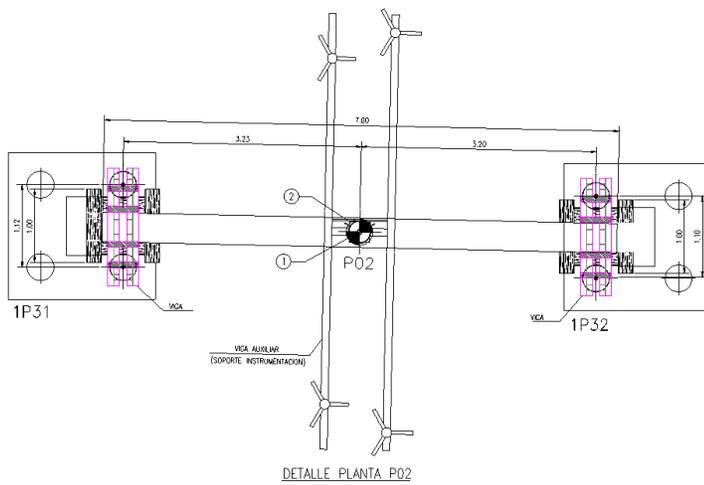


Figura VII-8 Vista en planta del ensayo de carga del pilote de prueba P2.

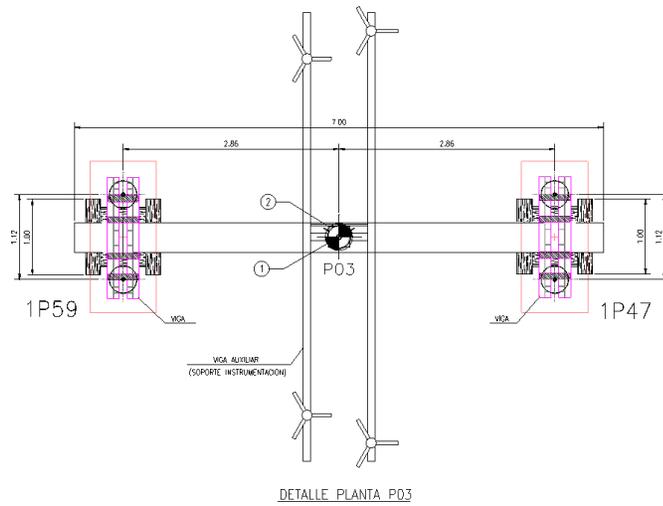


Figura VII-9 Vista en planta del ensayo de carga del pilote de prueba P3.

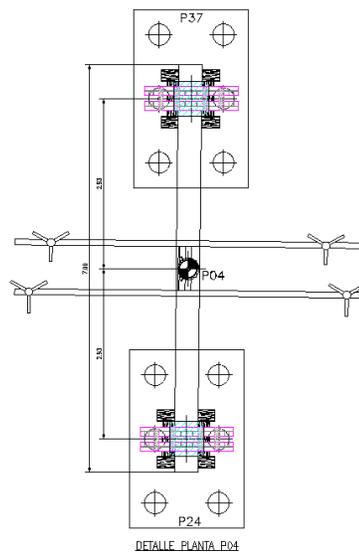


Figura VII-10 Vista en planta del ensayo de carga del pilote de prueba P4.

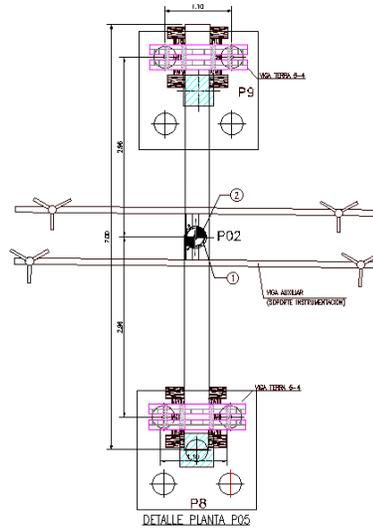


Figura VII-11 Vista en planta del ensayo de carga del pilote de prueba P5.

El gato hidráulico se apoyó en una placa con calota, para eliminar los problemas de excentricidad por la falta de paralelismo que existieron entre la superficie del pilote y el plano inferior de la viga de reacción. Estos se apoyaron a su vez sobre una placa de reparto de 25mm de espesor que es la encargada de transmitir la carga uniformemente sobre la superficie de la cabeza del pilote.

La carga se aplicó mediante un gato hidráulico accionado por una bomba hidráulica. La capacidad del equipo permitió alcanzar la carga máxima prevista de 150 (Ton).

La cabeza del pilote se condicionó de manera que se eliminó el hormigón de mala calidad o con impurezas (descabezado), y se pudo tomar con seguridad la carga del ensayo, como se puede observar en la [Figura VII.12](#) ~~Figura VII-12~~.

**Con formato:** Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática



Figura VII-12 Vista general del ensayo de carga.

Los comparadores estuvieron montados con base magnética a un bastidor o estructura auxiliar apoyada en forma independiente a la estructura cargada.

Se colocaron dos comparadores repartidos como se muestra en la [Figura VII-13](#) sobre la superficie del pilote para obtener finalmente un promedio de las deformaciones medidas.



Figura VII-13 Vista del montaje de los comparadores sobre el pilote de prueba.

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

**Con formato:** No revisar la ortografía ni la gramática

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

b) Barras de reacción.

Las barras embebidas en los pilotes de reacción fueron diseñadas por barras huecas. La carga de reacción en las barras fue inferior al 90% de la carga de fluencia ( $P_y$ ) ~~Tabla VII-4~~ **Tabla VII-4**.

A partir de la carga máxima de los ensayos 150 (Ton) se obtuvo la carga de reacción que resistió cada barra:  $150 \text{ (Ton)} / 4 = 37.5 \text{ (Ton)}$ , por lo que se utilizaron barras tipo TITAN 40/16. A continuación, se detallan sus características técnicas:

Tabla VII-4 Características técnicas de la barra

TIPO DE BARRA	T40/16
Diámetro Exterior Nominal [mm]	40
Carga de fluencia $P_y$ [kN]	525
Carga de rotura $P_u$ [kN]	660
Peso [kg/ml]	7.17

c) Proceso de carga.

En el ensayo de carga de los pilotes de prueba P1, P2, P3, P4 y P5 la carga máxima de prueba ( $P_p$ ) corresponde a 150 (Ton). La carga máxima de prueba fue aplicada en incrementos del 5% de carga uniforme hasta alcanzar la carga máxima del ensayo para luego proceder con la descarga. Para los escalones de carga intermedios (previos a la carga de prueba) el tiempo de observación mínimo para que se estabilice la deformación fue de 5 min, tomando lecturas de deformación en los minutos 0, 1, 2, 5, 10 y 15.

Para el caso del escalón de carga correspondiente a la carga de prueba, el tiempo de observación mínimo fue de 5 min. Para determinar la estabilización en cada carga, se leyeron los diales en los minutos 0, 1, 2, 5, 10 y 15 de acuerdo con lo requerido.

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

## VII.4.2. Métodos analíticos

### VII.4.2.1. Método de Eslami y Fellenius (1997)

El primer método estudiado corresponde a Eslami y Fellenius (1997), se basa en los valores  $q_c$  (Resistencia del cono), los cuales se obtuvieron correlacionando los valores obtenidos del SPT (golpes/pie) a valores  $q_c$  (MPa) del CPT, este método se encuentra descrito en la sección V.4.1.

Para obtener la capacidad de carga última  $Q_u$  se consideran los valores calculados de  $q_c$  (MPa) mostrado en la ~~Tabla VII-5~~Tabla VII-5. Se estudiaron 5 pilotes de prueba, de un diámetro de 0.36 m con distinto sello de fundación.

Tabla VII-5 Valores  $q_E$  (MPa) correlacionados con los valores SPT (golpes/pie).

Profundidad (m)	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00
SPT (golpes/pie)	4.00	4.00	2.00	2.00	11.00	11.00	14.00	18.00	25.00	29.00	18.00	22.00	24.00	28.00	35.00
$q_c$ (Mpa)	0.80	1.60	0.40	0.40	4.40	4.40	5.60	7.20	10.00	11.60	7.20	8.80	9.60	11.20	14.00

Profundidad (m)	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00	25.00	26.00	27.00	28.00	29.00	30.00
SPT (golpes/pie)	37.00	40.00	42.00	44.00	34.00	25.00	24.00	23.00	20.00	15.00	27.00	15.00	17.00	15.00	22.00
$q_c$ (Mpa)	14.80	16.00	16.80	17.60	6.80	5.00	9.60	4.60	4.00	3.00	5.40	6.00	3.40	3.00	4.40

El valor del coeficiente de capacidad por punta  $C_t$  se consideró 1 para cualquier tipo de suelo. El coeficiente de fricción lateral  $C_s$  se adopta de acuerdo a la ~~Tabla V-2~~Tabla V-2, para los estratos de arenas limosas se adopta un valor de 0.01.

### VII.4.2.2. Método de NeSmith (2002)

El método de NeSmith (2002) es aplicado concretamente para pilotes de desplazamiento total, basado en los valores de  $q_c$  (MPa), los cuales fueron calculados a partir de los valores del ensayo SPT (golpes/pie).

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Tabla VII-6 Valores  $q_c$  (MPa) correlacionados con los valores SPT(golpes/pie).

Profundidad	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00
SPT (golpes/pie)	4.00	4.00	2.00	2.00	11.00	11.00	14.00	18.00	25.00	29.00	18.00	22.00	24.00	28.00	35.00
$q_c$ (Mpa)	0.80	1.60	0.40	0.40	4.40	4.40	5.60	7.20	10.00	11.60	7.20	8.80	9.60	11.20	14.00

Profundidad	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00	25.00	26.00	27.00	28.00	29.00	30.00
SPT (golpes/pie)	37.00	40.00	42.00	44.00	34.00	25.00	24.00	23.00	20.00	15.00	27.00	15.00	17.00	15.00	22.00
$q_c$ (Mpa)	14.80	16.00	16.80	17.60	6.80	5.00	9.60	4.60	4.00	3.00	5.40	6.00	3.40	3.00	4.40

El valor de  $w_t$  se obtiene de la [Tabla V-3](#) ~~Tabla V-3~~, el cual se estima de acuerdo con el porcentaje de finos que pasa el Tamiz N°200.

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Tabla VII-7 Porcentaje de finos que pasa el Tamiz N°200.

Clasif. SUCS	CL	SP- SM	CL	CL	SP	SP	SP	SM	SM	SM	SM	SP- SM	SP- SM	SP	SP
Profundidad	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00
%Fino T N°200	91.00	9.00	46.00	46.00	3.00	3.00	3.00	9.00	9.00	7.00	7.00	9.00	9.00	3.35	2.62

Clasif. SUCS	SP	SP	SP-SM	SP- SM	CL	CL	SM	CL	CL	CL	ML	SP- SM	CL	CL	CL
Profundidad	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00	25.00	26.00	27.00	28.00	29.00	30.00
%Fino T N°200	2.62	10.82	10.82	10.82	90.04	90.04	16.07	92.27	92.27	92.27	85.22	9.38	87.79	87.79	87.79

#### VII.4.2.3. Método de la EAP-DIN EN 12699 (2014)

Este método está basado en el Manual de la EAP (*Recommendations on Piling EA Pfähle*) de acuerdo a la norma DIN EN 12699.

La resistencia de la punta  $q_{bk}$  (kN/m<sup>2</sup>) se calcula mediante la interpolación del valor de  $q_c$  (MPa) en la [Tabla V-4](#) ~~Tabla V-4~~.

Con formato: Fuente: Sin Negrita

La resistencia de fricción  $q_{sk}$  (kN/m<sup>2</sup>) se calcula mediante la interpolación del valor de  $q_c$  (MPa) en la [Tabla V-5](#) ~~Tabla V-5~~.

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Para obtener la capacidad de carga última  $Q_u$  de acuerdo al método de la EAP - DIN EN 12699 (2014), se utilizó el software AXPILE-GGU siendo los valores de entrada  $q_c$  (MPa).

Con formato: No revisar la ortografía ni la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita

## VII.5. Asentamiento del pilote aislado cargado axialmente

En este apartado, se describen los parámetros y consideraciones empleadas en el análisis de asentamiento de los pilotes bajo carga axial según los métodos analíticos, los cuales hacen referencia a Fellenius (1999), la Función de transferencia hiperbólica y EAP - DIN EN 12699 (2014).

Tabla VII-8 Métodos analíticos para generar la curva carga vs. asentamiento.

Capacidad de carga última $Q_u$	Curva Carga vs. asentamiento
Eslami y Fellenius (1997)	Fellenius (1999) – Función de transferencia hiperbólica
NeSmith (2002)	Fellenius (1999)
EAP-DIN EN 12699 (2014)	EAP-DIN EN 12699 (2014)

### VII.5.1. Fellenius (1999)

El asentamiento se estimó utilizando el método de Fellenius (1999) descrito en la sección V.5.1. La curva de asentamiento se calculó mediante el valor de capacidad de carga última  $Q_u$  según Eslami y Fellenius (1997) y NeSmith (2002), de acuerdo con la sección V.3 y la capacidad en la base y en el fuste se estimaron de acuerdo con la sección V.4.1 y V.4.2

Este método permitió elaborar los gráficos de carga vs. asentamiento a partir de la capacidad de carga última, los cuales posteriormente se compararán.

Según este método el asentamiento para movilizar la resistencia última por punta equivalente a 36 mm y para movilizar la resistencia por fuste a 10 mm.

En la curva de asentamiento, el  $\delta_u$  se segmenta en intervalos para obtener los asentamientos intermedios desde el origen hasta la deformación final  $\delta_u + \delta_e$ , donde  $\delta_e$  es la deformación elástica del pilote por compresión, hasta alcanzar la capacidad última del pilote.

### VII.5.2. Función de transferencia hiperbólica Chin (1970).

El asentamiento se estimó de acuerdo con el descrito en la sección V.5.2. La curva de asentamiento se calculó mediante el valor de capacidad de carga última  $Q_u$  obtenido de Eslami y Fellenius (1997) donde la capacidad en la base y en el fuste se calcularon de acuerdo con la sección V.4.1.

Para movilizar el 90% de la fricción lateral se requiere un desplazamiento de 5-10 mm, y un desplazamiento de 36 mm para movilizar la capacidad por punta.

Las funciones para la capacidad de carga de la punta y la fricción lateral están determinadas para el desplazamiento de cada punto del pilote. El desplazamiento inmediato en la cabeza del pilote es igual al asentamiento del pilote  $\delta$ . Sin embargo, debido a la compresión elástica, la relación  $\delta_t/\delta$  se vuelve progresivamente más pequeña a medida que aumenta la longitud del pilote y el asentamiento en la punta  $\delta_t$ , puede ser significativamente menor.

La parte superior de la curva carga vs. asentamiento está influenciada principalmente por la fricción lateral del pilote, mientras que la capacidad de la punta se desarrolla gradualmente y se moviliza completamente mucho después.

#### **VII.5.3. EAP-DIN EN 12699 (2014)**

La curva carga vs. asentamiento se calculó mediante la resistencia característica total del pilote  $R_k$ , de acuerdo con la sección [V.4.3V.5.3](#).

Esta curva permitió establecer de forma gráfica el estado límite por falla que es el estado límite de rotura, que está asociado con el asentamiento de falla. El asentamiento de falla  $s_g$  corresponde al valor de  $s/D=10\%$ . En el gráfico se presenta el valor de la resistencia característica del pilote  $R_{1,k}$  asociado al asentamiento de falla.

Esta curva carga vs. asentamiento se generó mediante el Software AXPILE-GGU.

Para suelos no cohesivos, la norma DIN EN 12699 proporciona los valores experimentales de resistencia por punta  $q_{b,k}$  y resistencia por fuste  $q_{s,k}$ , en función de los valores  $q_c$  (*Cone Penetration Test*).

El sello de fundación del pilote debe ser establecido donde la resistencia del suelo sea suficiente para soportar las cargas impuestas. La resistencia mínima de punta debe ser  $q_c=7.5$  (MN/m<sup>2</sup>).

Es importante tomar en cuenta que las condiciones relacionadas a la profundidad mínima de incrustación del pilote en el estrato resistente y la extensión de este estrato, no las verifica el Software AXPILE-GGU. A partir de la longitud del pilote y la estratificación del suelo, el programa determina únicamente en que capa de suelo se localiza el sello de fundación del pilote.

## VII.6. Pilotes cargados lateralmente

En este apartado, se describe las consideraciones y los parámetros empleados en el análisis analítico para pilotes sometidos a cargas laterales. Se evaluó un pilote de diámetro 0.36 m y una longitud de 13.75 m para una carga lateral de 3.5 (Ton), este valor permite tener un comportamiento lineal del pilote.

**Comentado [A45]:** Usar notación consistente en documento ( $\phi$  se usa para ángulo interno de roce en otras partes del informe).

### VII.6.1. Método de Broms (1965)

El pilote predimensionado, se evalúa utilizando el método de Broms (1965), de acuerdo con el apartado V.6.1.1.

El análisis se realizó para un pilote largo de condición empotrada restringida al giro. Mediante este método se calculó la carga última que permite generar la condición de falla, precisa evaluación del momento de fluencia  $M_y$  de la sección transversal del pilote.

De acuerdo a la sección V.6.1.1, se calculó la resistencia lateral última también se puede utilizar ábaco de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.Figura V-16.** Mediante la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.Figura V-21** se puede obtener la deflexión en la cabeza del pilote para una carga lateral  $Q_g$ .

### VII.6.2. Método elástico Reese (1984)

Se evaluaron los esfuerzos internos del pilote mediante el método elástico Reese (1984) sección V.6.1.2.

El desplazamiento y el momento flector se calcularon mediante las ecuaciones (1.32) y (1.34). También se pueden utilizar los ábacos del Manual de Carreteras (2018) sin necesidad de resolver las ecuaciones diferenciales. Esta formulación no toma en cuenta la no linealidad del comportamiento del suelo.

### VII.6.3. Método no lineal curvas p-y

Para incorporar la no linealidad del suelo se analizó el pilote mediante el método de las curvas no lineales p-y. Esta formulación supone que el comportamiento del suelo a una cierta profundidad es independiente del comportamiento del suelo a otras profundidades. Este método se evaluó de acuerdo con la sección V.6.1.4. para pilote en suelos arenosos.

Con el fin de comparar resultados de comportamiento no lineal se utilizó el software Civil de Midas y Lpile de Ensoft Inc, los cuales generan internamente las curvas p-y cuya rigidez obedece a la variación con la profundidad.

## VIII. RESULTADOS

La presente sección muestra los resultados de capacidad de carga última obtenidos de los métodos analizados en la Sección V.4.

### VIII.1. Capacidad del pilote aislado bajo carga axial

#### VIII.1.1. Método de Eslami y Fellenius (1997)

A continuación, se muestra los resultados del análisis de capacidad última  $Q_u$  según Eslami Fellenius (1997). El diámetro de los pilotes ensayados es de 0.36 m y las longitudes de los pilotes P1, P2, P3, P4 y P5 son 13.75 m, 10.30 m, 10.70 m, 7.7 m y 11.9 m respectivamente.

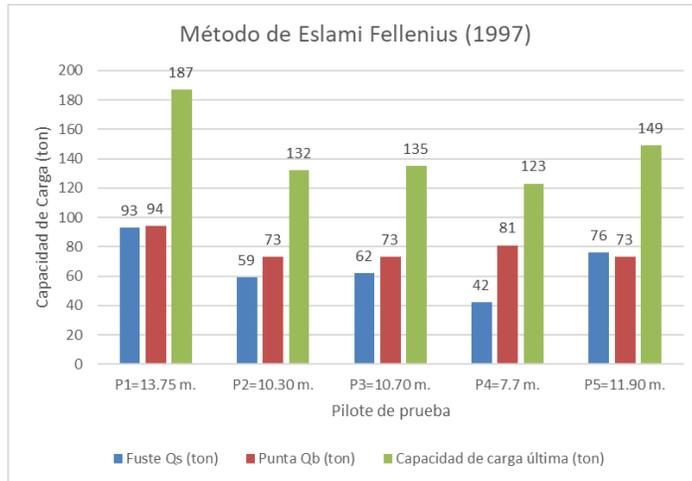


Figura VIII-1 Capacidad de carga última (Eslami y Fellenius, 1997).

La ~~Figura VIII-1~~ ~~Figura VIII-1~~ muestra la variación de la capacidad de carga última  $Q_u$  en función de la longitud de los pilotes utilizando el método de Eslami y Fellenius (1997). Se puede observar que este método aporta mayor capacidad por punta respecto a la capacidad

**Comentado [A46]:** Las longitudes no están en el gráfico.

**Comentado [A47R46]:** Se incluyo las longitudes

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

por fuste de acuerdo al sello de fundación. Los pilotes P1 y P5 son los más largos y prácticamente la capacidad de punta y fuste son muy similares.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la capacidad de carga última de los pilotes de prueba.

Tabla VIII-1 Capacidad analítica de carga última (Eslami y Fellenius, 1997).

N° Pilote	Longitud Pilote (m)	CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA		
		Fuste Qs (Ton)	Punta Qb (Ton)	Total Qu (Ton)
P1	13.75	93	94	187
P2	10.30	59	73	132
P3	10.70	62	73	135
P4	7.70	42	81	123
P5	11.90	76	73	149

### VIII.1.2. Método de NeSmith (2002)

A continuación, se muestran los resultados del análisis de capacidad última Qu, según NeSmith (2002).

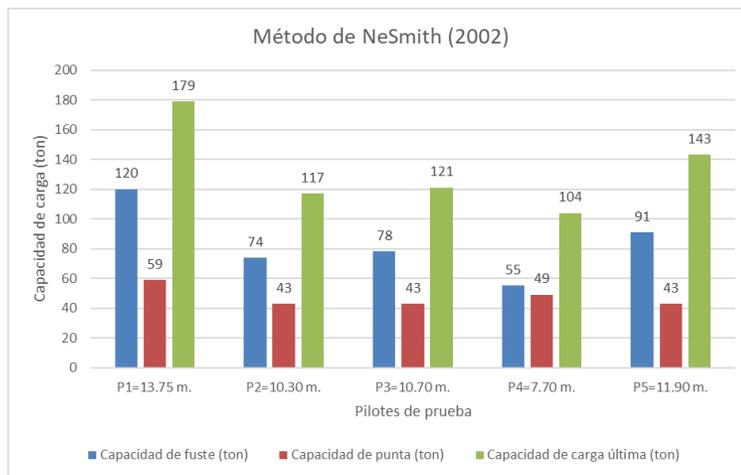


Figura VIII-2 Capacidad de carga última (NeSmith, 2002).

**Comentado [A48]:** Mismo comentario anterior.

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

La ~~Figura VIII.2~~ ~~Figura VIII.2~~ muestra la variación de la capacidad de carga última  $Q_u$  en función de la longitud de los pilotes utilizando el método de NeSmith (2002). También se puede observar que en todos los casos el pilote presenta mayor capacidad por fuste que por punta.

El diámetro del pilote es de 0.36 m y las longitudes de los pilotes son: 13.75 m, 10.30 m, 10.70 m, 7.7 m y 11.9 m.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la capacidad de carga última de los pilotes.

Tabla VIII-2 Capacidad de carga última (NeSmith, 2002).

N° Pilote	Longitud Pilote (m)	CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA		
		Fuste $Q_s$ (Ton)	Punta $Q_b$ (Ton)	Total $Q_u$ (Ton)
P1	13.75	120	59	179
P2	10.30	74	43	117
P3	10.70	78	43	121
P4	7.70	55	49	104
P5	11.90	91	43	143

### VIII.1.3. Método de la EAP – DIN EN 12699 (2014)

A continuación, se muestran los resultados de capacidad última  $Q_u$  de acuerdo al Método de la EAP, el cual está basado en la norma DIN EN 12699. Para obtener las resistencias por fuste y punta mostradas a continuación, se utilizó el software AX-PILE de GGU.

Todos los pilotes de prueba tienen un diámetro de 0.36 m y las longitudes son: P1=13.75m, P2=10.30 m, P3=10.70 m, P4=7.7 m y P5=11.9 m.

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

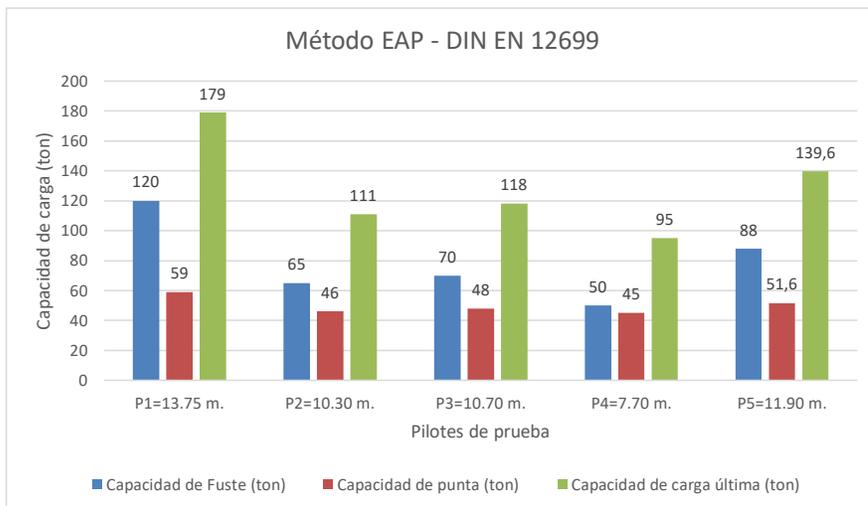


Figura VIII-3 Capacidad de carga última (EAP-DIN 12699, 2014).

La ~~Figura VIII-3~~ ~~Figura VIII-3~~ muestra la variación de la capacidad de carga última  $Q_u$  en función de la longitud de los pilotes.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la capacidad de carga última de los pilotes:

Tabla VIII-3 Capacidad de carga última (EAP-DIN EN 12699, 2014).

N°	Longitud Pilote (m)	CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA		
		Fuste $Q_s$ (Ton)	Punta $Q_b$ (Ton)	Total $Q_u$ (Ton)
P1	13.75	120	59	179
P2	10.30	65	46	111
P3	10.70	70	48	118
P4	7.70	50	45	95
P5	11.90	88	51.6	139.6

Comentado [A49]: Ídem.

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

### VIII.1.4. Comparación capacidad de carga última $Q_u$

A continuación, se realiza una comparación de los resultados obtenidos por los distintos métodos analíticos y experimentales. En la ~~Tabla VIII-4~~ Tabla VIII-4 se observan los resultados de capacidad de carga última  $Q_u$ .

Tabla VIII-4 Comparación de resultados.

N° Pilote	Longitud Pilote (m)	CAPACIDAD DE CARGA ULTIMA			
		Ensayo Cap. Carga	NeSmith (2002)	EAP-AXPILE GGU	Eslami y Fellenius(1997)
P1	13.75	150	179	179	187
P2	10.30	112.5	117	111	132
P3	10.70	120	121	118	135
P4	7.70	105	104	95	123
P5	11.90	135	134	139.6	149

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Comentado [A50]:** No usar fondos de colores para las tablas. Esto vale para todo el documento.

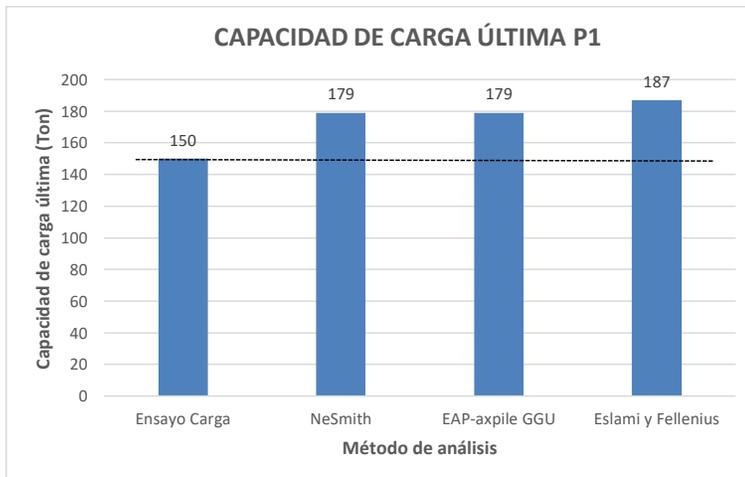


Figura VIII-4 Comparación de capacidad última  $Q_u$  del pilote de prueba P1.

**Comentado [A51]:** Favor ver otra forma de desplegar esta comparación. No me parece clara.

Comentado [A52R51]: Inicialmente no estaba clara y lo cambie a barras

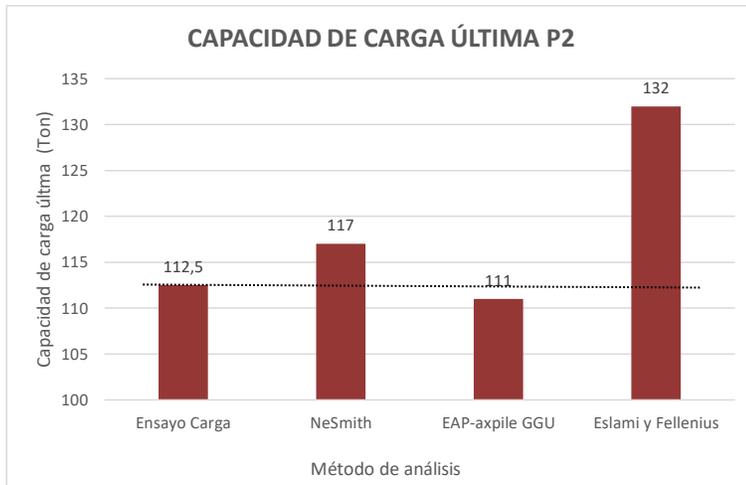


Figura VIII-5 Comparación de capacidad última  $Q_u$  del pilote de prueba P2.

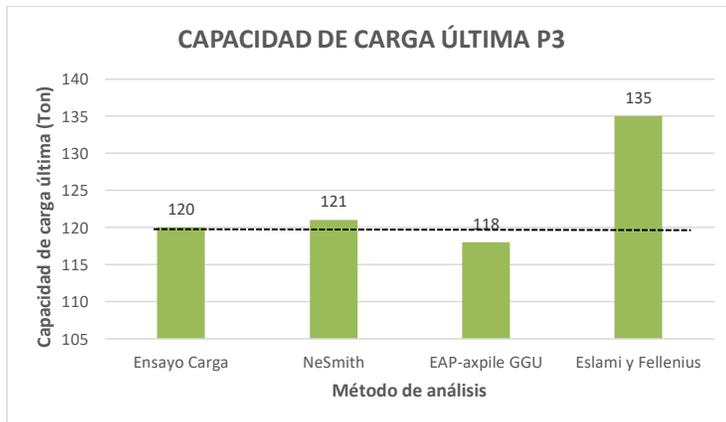


Figura VIII-6 Comparación de capacidad última  $Q_u$  del pilote de prueba P3.

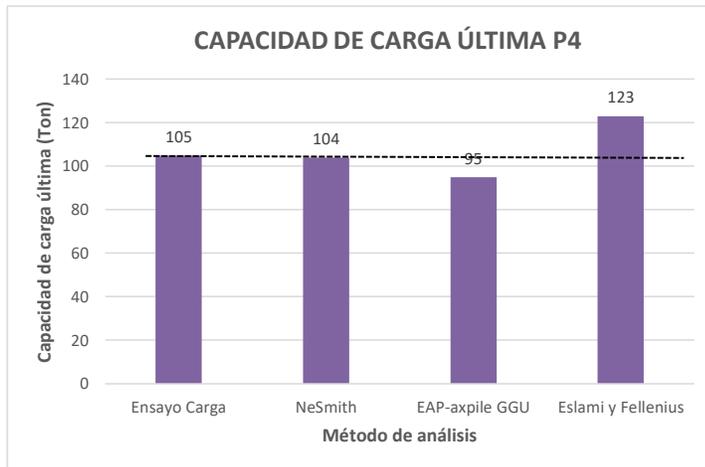


Figura VIII-7 Comparación de capacidad última  $Q_u$  del pilote de prueba P4.

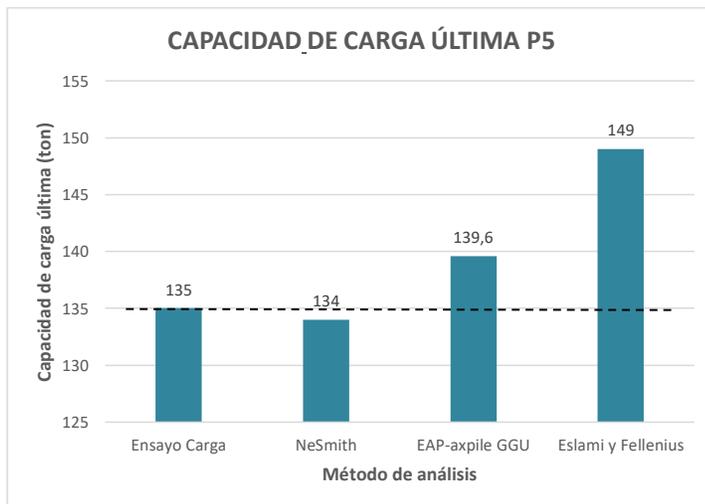


Figura VIII-8 Comparación de capacidad última  $Q_u$  del pilote de prueba P5.

La ~~Tabla VIII-5~~ ~~Tabla VIII-5~~ muestra la diferencia porcentual de los resultados de capacidad de carga última de los métodos analíticos respecto al ensayo experimental.

Tabla VIII-5 Diferencia porcentual.

N° Pilote	Longitud Pilote(m)	Diferencia %		
		NeSmith (2002)	EAP-AXPILE GGU	Eslami y Fellenius (1997)
P1	13.75	19.33	19.33	24.67
P2	10.30	4.00	-1.33	17.33
P3	10.70	0.83	-1.67	12.50
P4	7.70	-0.95	-9.52	17.14
P5	11.90	-0.74	3.41	10.37

En los gráficos de barras la ~~Figura VIII-4~~ ~~Figura VIII-4~~, 5, 6, 7 y 8 se muestran los resultados del ensayo de capacidad de carga última efectuado a escala real y los obtenidas de los métodos analíticos Eslami y Fellenius (1997); NeSmith (2002); EAP-DIN EN 12699 (2014).

El método de Eslami y Fellenius (1997) presenta una capacidad de carga última mayor a la del ensayo de carga en un valor aproximado del 25% para el pilote P1 y del 10.37% para el pilote P5, se puede observar en la curva experimental que no se pudo realizar la descarga debido a que ocurrió la falla estructural en la cabeza del pilote para una carga de 150 (Ton) en el P1 y 135 (Ton) en el P5.

En los pilotes P2, P3, P4 la capacidad de carga última excede un 12-18% la carga obtenida de la curva experimental, en este método los pilotes toman mayor carga por punta que por fricción.

El método de NeSmith (2002) excede entre un 4-19% la capacidad de carga última para los pilotes P1 y P5, y para los pilotes P2, P3, P4 este valor se encuentra por debajo del 1-10% del obtenido de la curva experimental por lo que se presentaría un valor conservador.

El método de la EAP-DIN EN 12699 (2014) excede entre un 4-19% la capacidad de carga última para los pilotes P1 y P5, y para los pilotes P2, P3, P4 este valor se encuentra por debajo del 1-10% del obtenido de la curva experimental por lo que se presentaría un valor más conservador.

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

La comparación realizada en esta sección muestra que el método de Eslami y Fellenius (1997) entrega mayores capacidades de carga última, sin embargo, los métodos de Nesmith (2002) y de la EAP-DIN EN 2699 son los que mejor se ajustan a los valores obtenidos del ensayo de capacidad de carga experimental para los pilotes de 10.3, 10.7 y 7.70 m, y para los pilotes de 13.75 m y 11.9 m, se excede el valor hasta en un 19%.

## VIII.2. Asentamiento pilote aislado carga axial

En esta sección se presentan los resultados de las curvas del análisis de carga vs. asentamiento para los pilotes de prueba cargados axialmente. El análisis se realizó para comparar la curva experimental con las curvas obtenidas de los métodos analíticos.

### VIII.2.1. Ensayo de capacidad de carga a la compresión

De acuerdo con los ensayos de compresión in situ de los pilotes descritos en la [Tabla VII-1](#) se obtuvieron los siguientes resultados para los cinco pilotes de prueba P1, P2, P3, P4 y P5 con los siguientes sellos de fundación: 13.75 m, 10.30m, 10.70, 7.7 y 11.9 m.

En los pilotes de prueba P1 y P5 al alcanzar la carga de 150 (Ton) y 135 (Ton), la cabeza del pilote se inclinó y posteriormente ocurrió la falla estructural local en la cabeza del pilote, por lo que se dio por finalizada la prueba y no se realizó la descarga.

Los pilotes de prueba P2, P3 y P4 muestran el comportamiento esperado entre la carga y descarga.

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

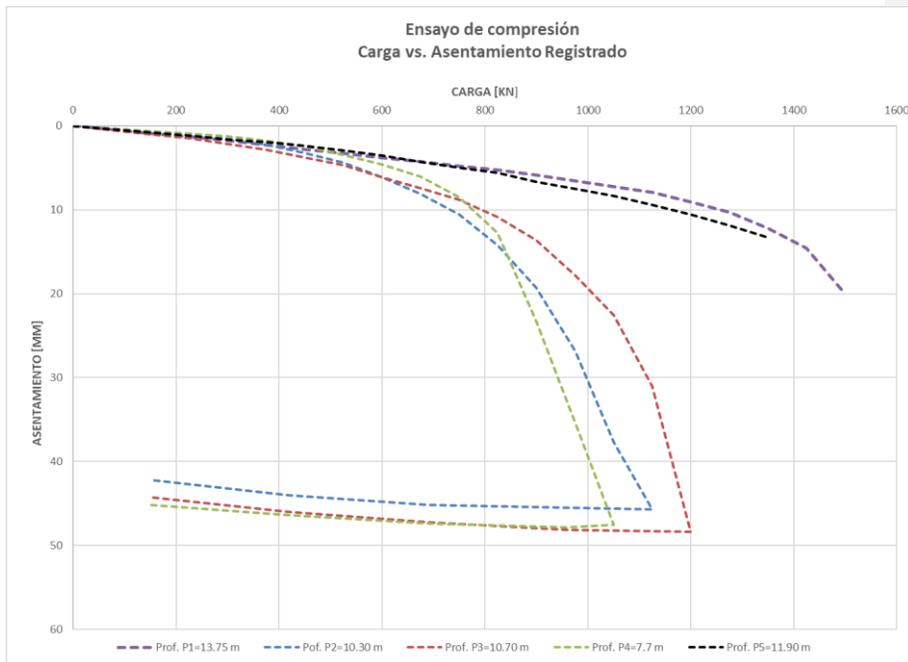
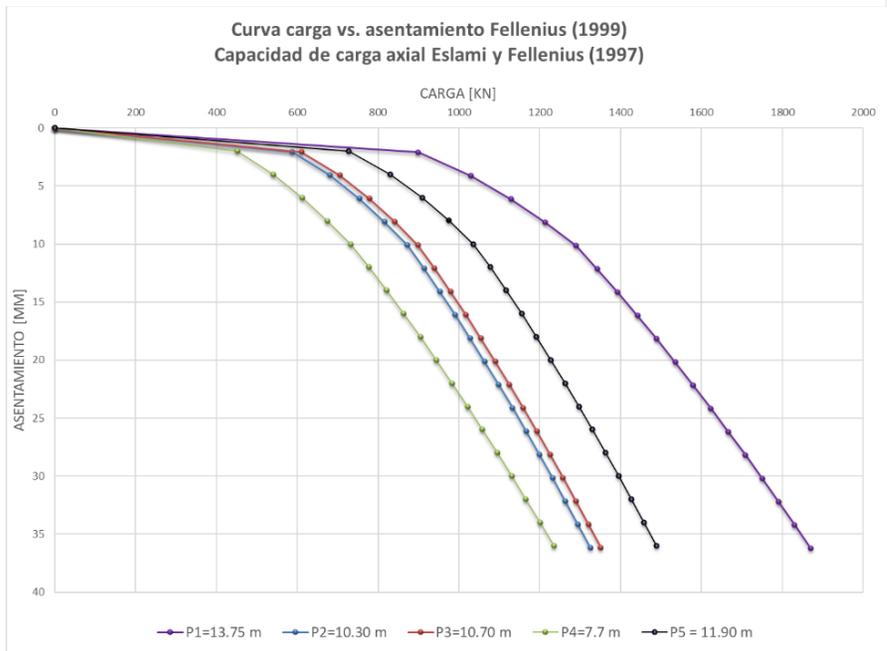


Figura VIII-9 Curvas carga-asentamiento experimental pilotes de prueba.

### VIII.2.2. Fellenius (1999) - Fellenius (1997)

Las curvas de capacidad última carga vs. asentamiento se obtuvieron mediante el método de Fellenius (1999) según los valores de capacidad última calculados de Eslami y Fellenius (1997) los cuales se muestran en la ~~Figura VIII-10~~ Figura VIII-10.



**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

Figura VIII-10 Curvas carga vs. asentamiento (Fellenius, 1999 – Eslami y Fellenius, 1997).

### VIII.2.3. Función de transferencia hiperbólica Chin - Eslami y Fellenius (1997)

Las curvas carga vs. asentamiento fueron evaluadas mediante la Función de transferencia hiperbólica Chin a partir de la capacidad última calculada según Eslami y Fellenius (1997).

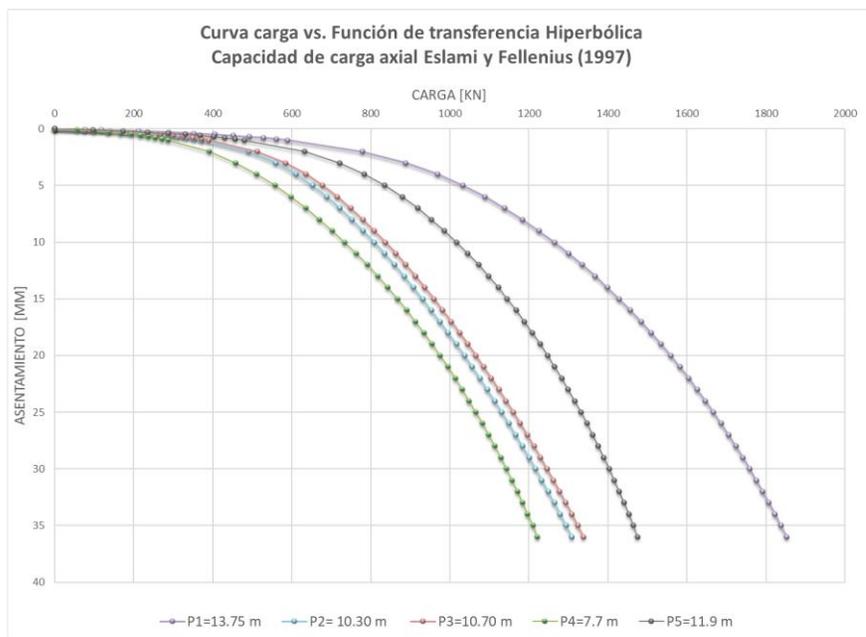


Figura VIII-11 Curvas carga vs. asentamiento (Función de transferencia hiperbólica de Chin – Eslami y Fellenius, 1997).

#### VIII.2.4. Fellenius (1999) – Función de transferencia hiperbólica Chin (1970)

En la [Figura VIII-12](#) se realizó la comparación de las curvas carga vs. asentamiento entre los métodos de Fellenius (1999) y la función de transferencia hiperbólica de Chin.

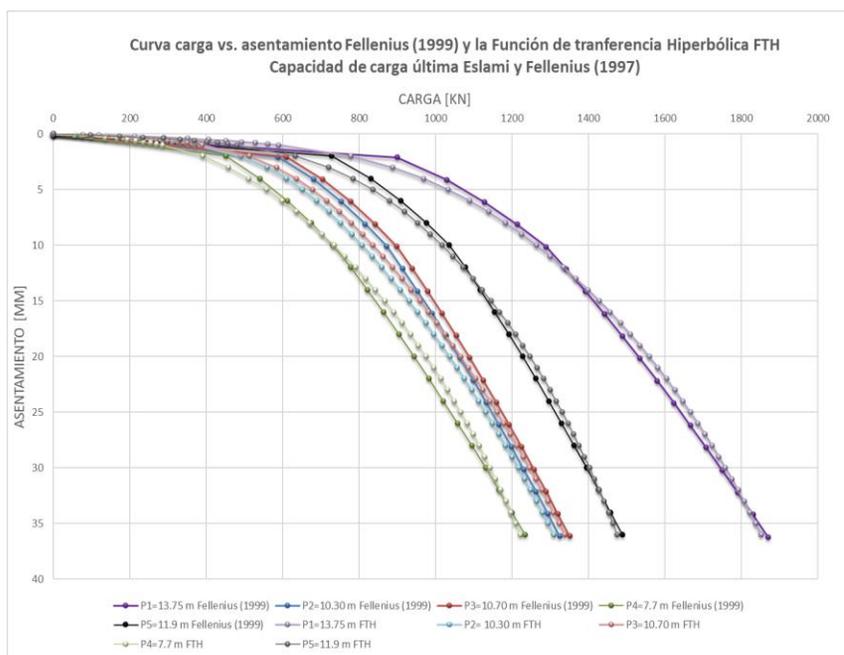


Figura VIII-12 Comparación de las curvas carga vs. asentamiento (Fellenius, 1999 y la Función de transferencia hiperbólica; Fellenius, 1997).

En la [Figura VIII-12](#) se puede observar que existe un buen ajuste entre las curvas generadas mediante el método de Fellenius (1999) y la Función de transferencia Hiperbólica las cuales se generaron a partir de los valores de capacidad última del método de Eslami y Fellenius (1997).

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita, Revisar la ortografía y la gramática

Con formato: Fuente: Sin Negrita, Revisar la ortografía y la gramática

#### VIII.2.4.1. Fellenius (1999) - NeSmith (2002)

Las trayectorias de carga vs. asentamiento se generaron mediante el método de Fellenius (1999) de acuerdo con los valores de capacidad última obtenidos a partir del método de NeSmith (2002), los resultados se presentan en la [Figura VIII-13](#).

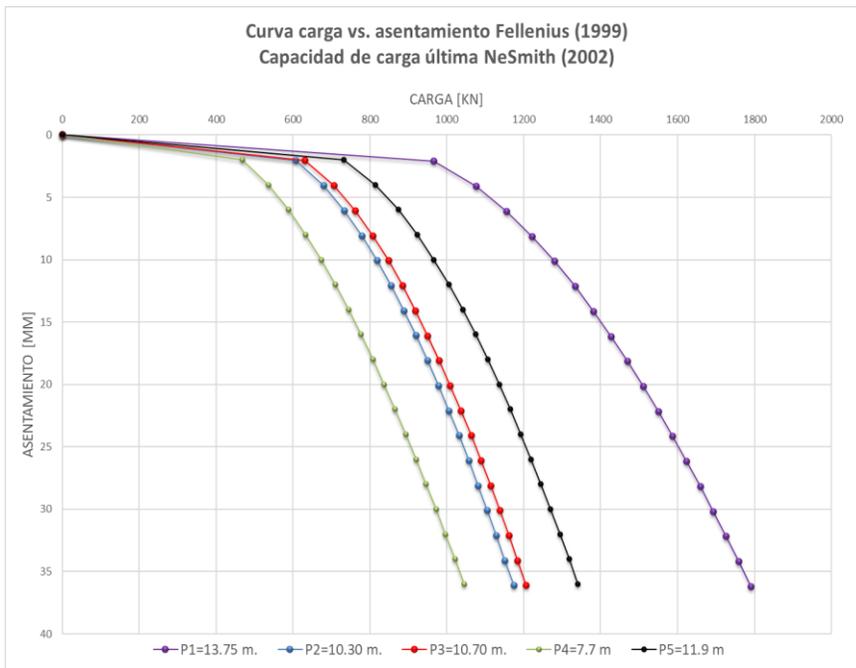


Figura VIII-13 Curvas carga vs. asentamiento (Fellenius, 1999; NeSmith, 2002).

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

#### VIII.2.4.2. EAP-DIN EN 12699 (2014)

Las curvas carga vs. asentamiento se generaron mediante el Software AXPILE de GGU el cual se basa en el método de la EAP-DIN EN 12699 (2014).

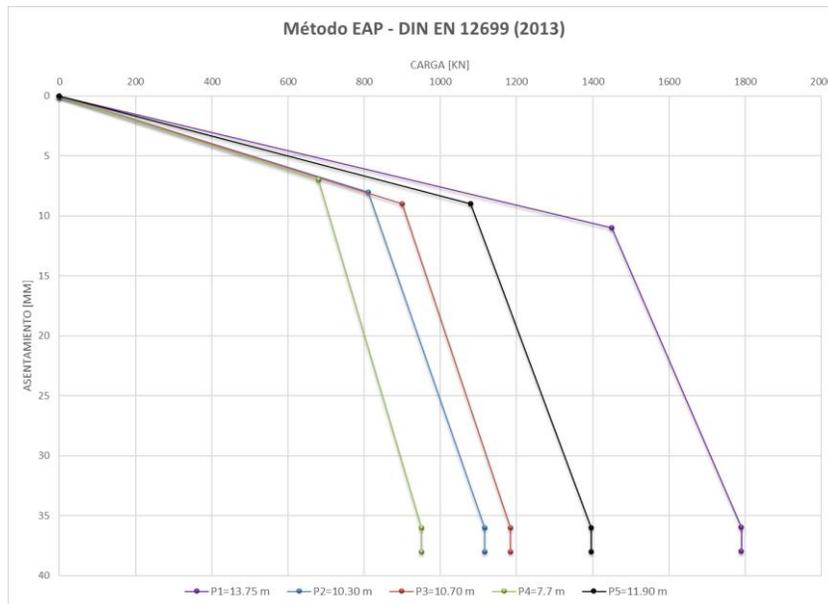


Figura VIII-14 Curvas carga vs. asentamiento (EAP-DIN EN 12699, 2014).

### VIII.2.5. Comparación de respuesta analítica y experimental.

En la presente sección se comparan los resultados de las curvas carga vs. asentamiento de los ensayos experimentales con los métodos analíticos presentados para cada pilote de forma individual.

#### VIII.2.5.1. Pilote cargado axialmente P1

Se comparó los resultados obtenidos de las curvas carga vs. asentamiento de los métodos analíticos con la curva experimental para el pilote de prueba P1.

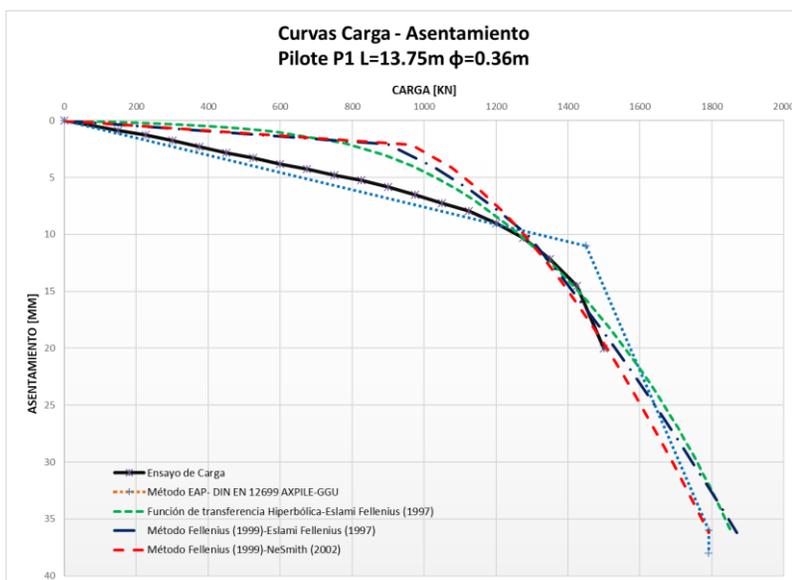


Figura VIII-15 Curva carga vs. asentamiento del pilote de prueba P1.

En la [Figura VIII-15](#) se puede observar que existe un buen ajuste en la rigidez inicial entre la curva experimental y la curva según la EAP-DIN EN 12699 (2014), también

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts, Sin Negrita, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts, Sin Negrita, Revisar la ortografía y la gramática

se puede observar el cambio de pendiente en la curva experimental ocasionada por la falla estructural en la cabeza del pilote para una carga de 150 (Ton).

La curva carga vs. asentamiento que mejor aproximación presento a la experimental fue la generada mediante el método de la EAP-DIN EN 12699 (2014) y NeSmith (2002) en la caída de la curva.

### VIII.2.5.2. Pilote cargado axialmente P2

Se comparó los resultados obtenidos de las curvas carga vs. asentamiento de los métodos analíticos con la curva experimental para el pilote de prueba P2.

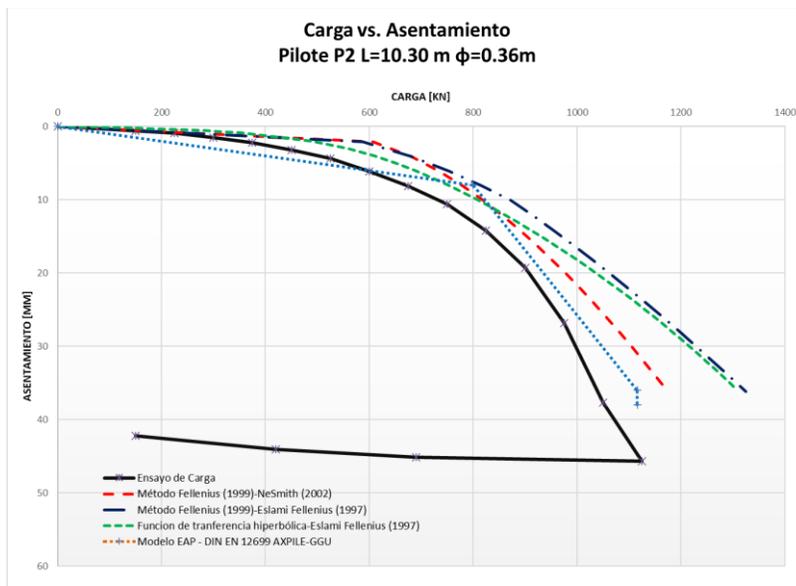


Figura VIII-16 Comparación curvas carga vs. asentamiento del pilote de prueba P2.

En la ~~Figura VIII-16~~ ~~Figura VIII-16~~ se analizó el resultado del ensayo experimental en comparación con los respectivos métodos analíticos. Se puede observar que los valores de las curvas obtenidos mediante los métodos analíticos exceden los valores de la curva experimental, esto nos indica que los estratos presentan menor resistencia. Las curvas

- Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto
- Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Revisar la ortografía y la gramática
- Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto
- Con formato: Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Revisar la ortografía y la gramática

generadas mediante el método de la EAP-DIN EN 12699 (2014) y NeSmith (2002) son las que mejor aproximación presentan frente a la curva experimental.

### VIII.2.5.3. Pilote cargado axialmente P3

Se comparó los resultados obtenidos de las curvas carga vs. asentamiento de los métodos analíticos con la curva experimental para el pilote de prueba P3.

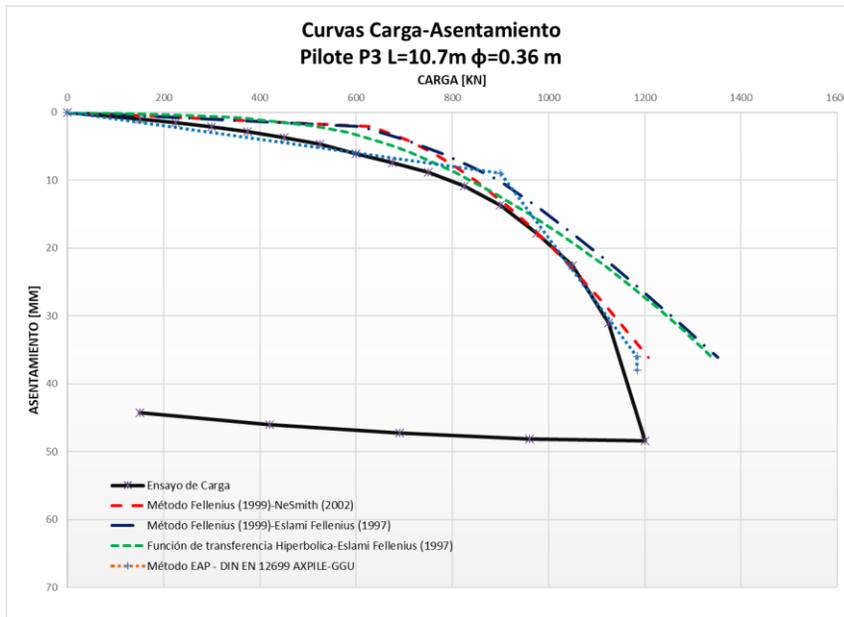


Figura VIII-17 Comparación curvas carga vs. asentamiento del pilote de prueba P3.

En la ~~Figura VIII-17~~ ~~Figura VIII-17~~ se analizó el resultado del ensayo experimental en comparación con los respectivos métodos analíticos. Se puede observar que los valores de las curvas obtenidos mediante los métodos analíticos exceden los valores de la curva experimental, esto nos indica que los estratos presentan menor resistencia.

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

La curva carga vs. asentamiento que mejor aproximación presento respecto a la experimental fue la generada según la EAP-DIN EN 12699 (2014) y NeSmith (2002) en la caída de la curva.

#### VIII.2.5.4. Pilote cargado axialmente P4

Se comparó los resultados obtenidos de las curvas carga vs. asentamiento de los métodos analíticos con la curva experimental para el pilote de prueba P4.

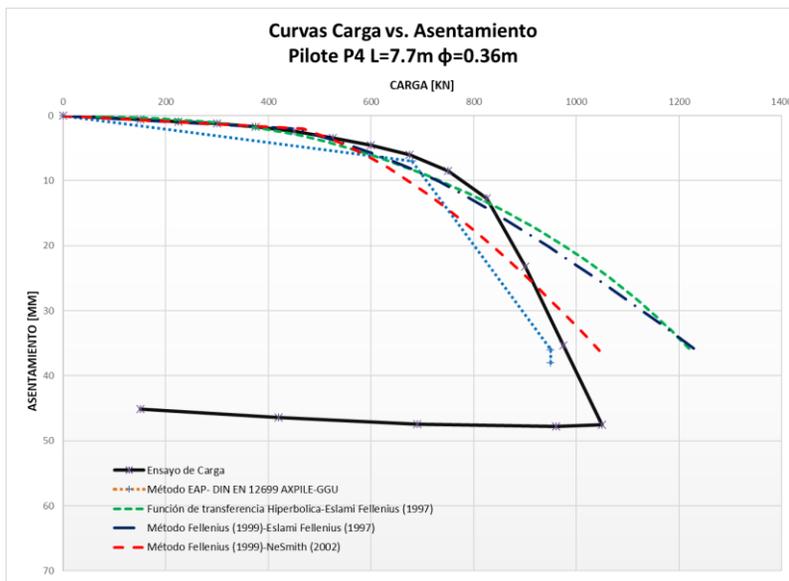


Figura VIII-18 Comparación curvas carga vs. asentamiento del pilote de prueba P4.

En la Figura VIII-18 se comparó el resultado del ensayo experimental con los métodos analíticos. Se puede observar que la curva obtenida según Eslami y Fellenius (1997) excede los valores de capacidad última de la curva experimental, la curva según NeSmith (2002) presenta un mejor ajuste, y por último la curva obtenida según la EAP-DIN

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

EN 12699 (2014) se encuentra por debajo la curva experimental por lo que es la más conservadora.

Las curvas carga vs. asentamiento que mejor ajuste presentaron respecto a la experimental fueron las generadas según la EAP-DIN EN 12699 (2014) y NeSmith (2002).

#### VIII.2.5.5. Pilote cargado axialmente P5

Se comparó los resultados obtenidos de las curvas carga vs. asentamiento de los métodos analíticos con la curva experimental para el pilote de prueba P5.

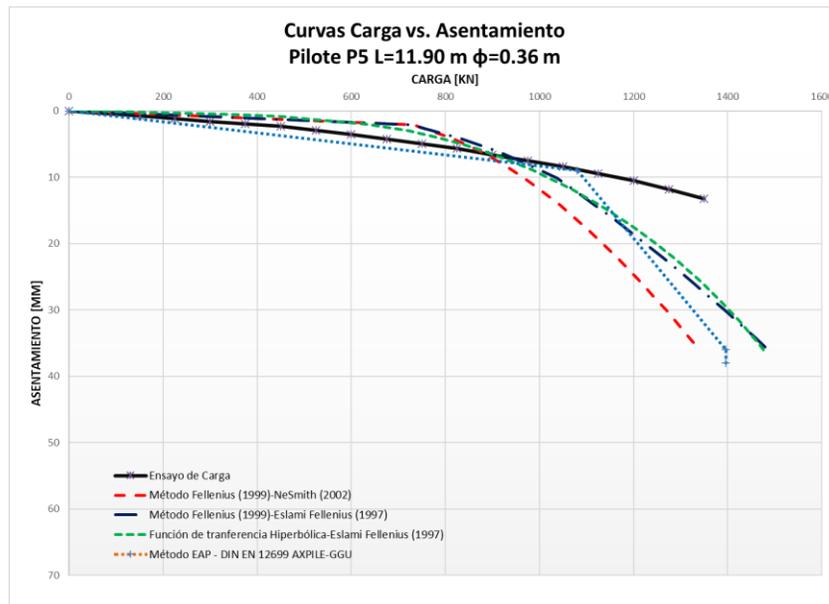


Figura VIII-19 Comparación curva carga vs. asentamiento del pilote de prueba P5.

En la ~~Figura VIII.19~~ ~~Figura VIII-19~~ se puede observar que existe un buen ajuste en la rigidez inicial entre la curva carga vs. asentamiento experimental y la curva según el método de la EAP-DIN EN 12699 (2014).

Se realizó la carga del pilote hasta que se llegó a la falla estructural de la cabeza del pilote a una carga de 135 (Ton).

Las curvas de carga vs. asentamiento que mejor aproximación presentaron respecto a la curva experimental fueron el método de la EAP-DIN EN 12699 (2014) y NeSmith (2002).

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

### VIII.3. Pilote aislado bajo carga lateral

En esta sección se muestran los resultados de los métodos analíticos aplicados a un pilote de 13.75 m de longitud y 0.36 m de diámetro. El análisis se realizó tomando en cuenta un comportamiento lineal y no lineal del suelo. El pilote fue analizado para una carga lateral de 3.5 (Ton), dicho valor nos permite tener un comportamiento lineal del pilote. Se consideró una condición de borde restringida a la rotación en la cabeza para modelar el empotramiento del pilote en el cabezal, el cual estará embebido en suelos de baja resistencia.

#### VIII.3.1. Método de Broms (1965)

A continuación, se presenta los cálculos utilizados en el presente método.

$\gamma'$ =	9	kN/m <sup>3</sup>	Peso específico efectivo
$\emptyset$ =	29	°	Ángulo de fricción interna
$K_p=\tan^2(45+\emptyset/2)$	2.88		Coefficiente de presión pasiva de Rankine
b=	0.36	m	Diámetro del pilote
$M_y$	80	kN-m	Momento de fluencia del pilote
			Distancia de aplicación de la carga medida
e=	0	m	desde la superficie del suelo.

Se obtiene la carga lateral última considerando la condición restringida en la cabeza mediante la ecuación (1.25):

$$P_{ult} = \frac{2M_y}{e + 0.544 \left( \frac{P_{ult}}{\gamma b K_p} \right)}$$

$$P_{ult} = \frac{2 * 80}{e + 0.54 \left( \frac{P_{ult}}{9 * 0.36 * 2.88} \right)}$$

$$P_{ult} = 93kN$$

También, se puede obtener la carga última del ábaco de la [Figura V-16](#).

$$\frac{M_y}{b^4 \gamma K_p} = 183.6$$

$$\frac{Q_u}{b^3 \gamma K_p} = 80$$

$$Q_u = 97kN$$

Para obtener la deflexión en la cabeza del pilote calculamos la longitud característica T.

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{k_{py}}} = 1.41$$

$$y_o = \frac{0.93P}{k_{py}^{3/5} (E_p I_p)^{2/5}} = 4.69mm$$

Por lo tanto, el desplazamiento en la cabeza del pilote será de 4.69 mm para una carga lateral de 3.5 (Ton). El factor 0.93 se obtiene del ábaco de la [Figura V-21](#).

### VIII.3.2. Evans and Duncan (1982)

Se aplicó el método a partir de las ecuaciones de la sección V.6.1.5.

$$V = 7700 \text{ lb}$$

Carga lateral.

$$B = 14.3 \text{ in}$$

Diámetro del pilote.

$$\phi' = 29^\circ$$

Angulo de presión efectiva del suelo.

$$\gamma = 52 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

Peso unitario del suelo desde la superficie del suelo hasta una profundidad de  $8\phi$  del pilote.

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

$f'_c = 3550 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$	Resistencia a la compresión del concreto.
$\lambda = 1$	Parámetro adimensional dependiente del comportamiento esfuerzo-deformación.
$\epsilon_{50} = 0.002$	Deformación axial a la cual se moviliza el 50% de la resistencia del suelo.
$R_1 = 1$	Si la sección transversal es circular.
$C_{p\phi} = 2.9$	Factor de presión pasivo.
$\sigma_p = 2C_{p\phi}\gamma B \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) = 13.33 \frac{\text{Lb}}{\text{in}^2}$	Presión pasiva representativa del suelo.
$E = 57000 \sqrt{f'_c}$	Módulo de elasticidad del suelo.
$V_c = \lambda B^2 ER_1 \left( \frac{\sigma_p}{ER_1} \right)^m (\epsilon_{50})^n = 2259108.3 \text{ Lb}$	Resistencia característica de corte
$\frac{V}{V_c} = 0.004$	Relación de corte.
$\frac{y_t}{B} = 0.007$	Carga de corte vs. Def. lateral arena.
$y_t = 0.1 \text{ in}$	Def. lateral en la parte superior del pilote.
$y_t = 2.54 \text{ mm}$	
$M_c = \lambda B^3 ER_1 \left( \frac{\sigma_p}{ER_1} \right)^m (\epsilon_{50})^n = 173535484.4 \text{ lb} - \text{in}$	Momento característico
$\frac{M_{\max}}{M_c} = 0.002$	Relación de corte vs. Relación de momento
$M_{\max} = 347071 \text{ lb} - \text{in}$	Momento máximo de empotramiento
$M_{\max} = 3.99 \text{ Ton} - \text{m}$	

### VIII.3.3. Método elástico de Reese (1984)

Se aplicaron las ecuaciones enunciadas en el apartado V.6.1.2 para obtener los desplazamientos y los esfuerzos internos del pilote.

$Q_g$	3.5	Ton	Carga lateral externa
$b$	0.36	M	Diámetro del pilote
$E_o$	5000	Ton/m <sup>2</sup>	Módulo de elasticidad del suelo
$k_h$	12500	Ton/m <sup>3</sup>	Constante de balasto
$E_p$	2E+06	Ton/m <sup>2</sup>	Módulo de elasticidad de pilote
$I_p$	0.0008	m <sup>4</sup>	Inercia polar
$\beta$	0.8695	1/m	

Se obtienen los coeficientes adimensionales  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  y  $D_1$  los cuales nos permitirán generar las deformadas de desplazamiento y los diagramas de esfuerzos internos que produce la carga lateral al ser aplicada.

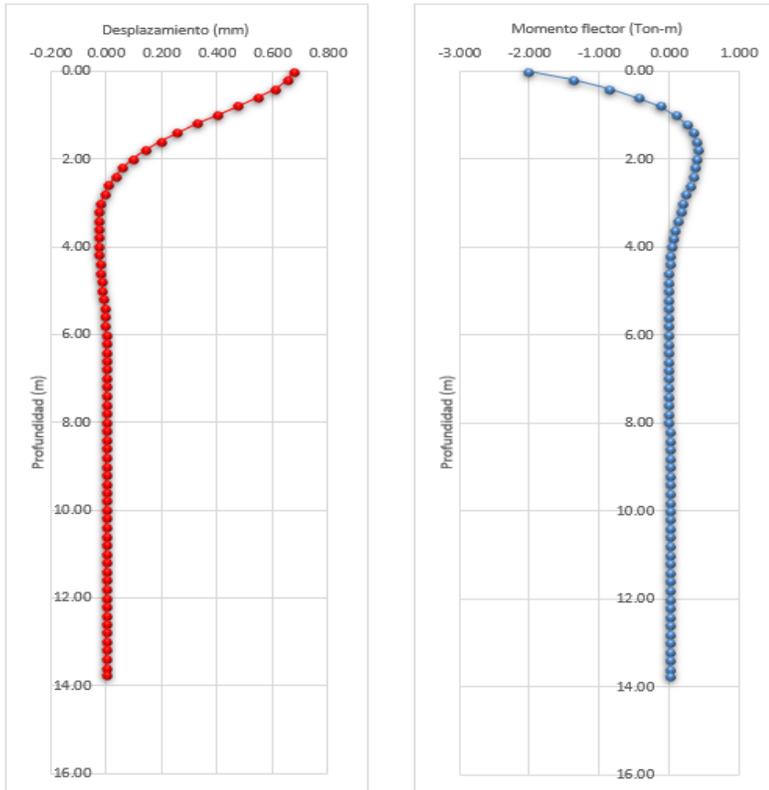


Figura VIII-20 Deformada y momento flector del pilote en arenas.

Tabla VIII-6 Desplazamiento y momento flector máximo para una carga de 3.5(Ton).

	Desplazamiento max (mm)	Momento max.(Ton-m)
Cabeza del pilote	0.676	-2.013

#### VIII.3.4. Curvas no lineales p-y (2001)

A continuación, se calcularon las curvas p-y en arenas según Reese y Van Impe (2001) para distintas profundidades hasta llegar a la base del pilote.

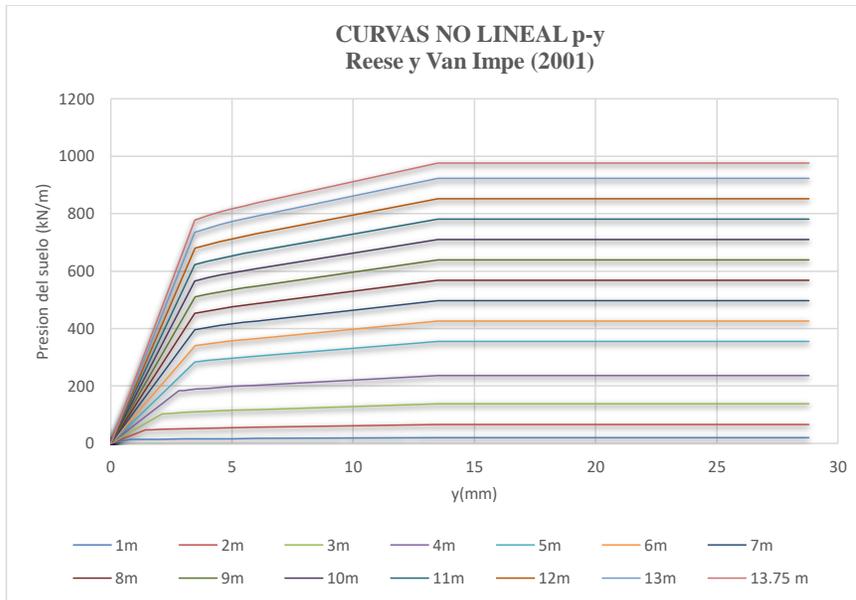


Figura VIII-21 Curvas no lineales p-y en arena a distintas profundidades de la cota 0 a 13.75m.

Las curvas p-y mostradas en la ~~Figura VIII-21~~ ~~Figura VIII-21~~ representan el comportamiento no lineal del suelo. El pilote se analizó en el software Civil Midas y el LPile de Ensoft, los cuales modelan internamente las curvas p-y, a continuación, se muestran los resultados de los diagramas de desplazamiento y momento flector.

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pts, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

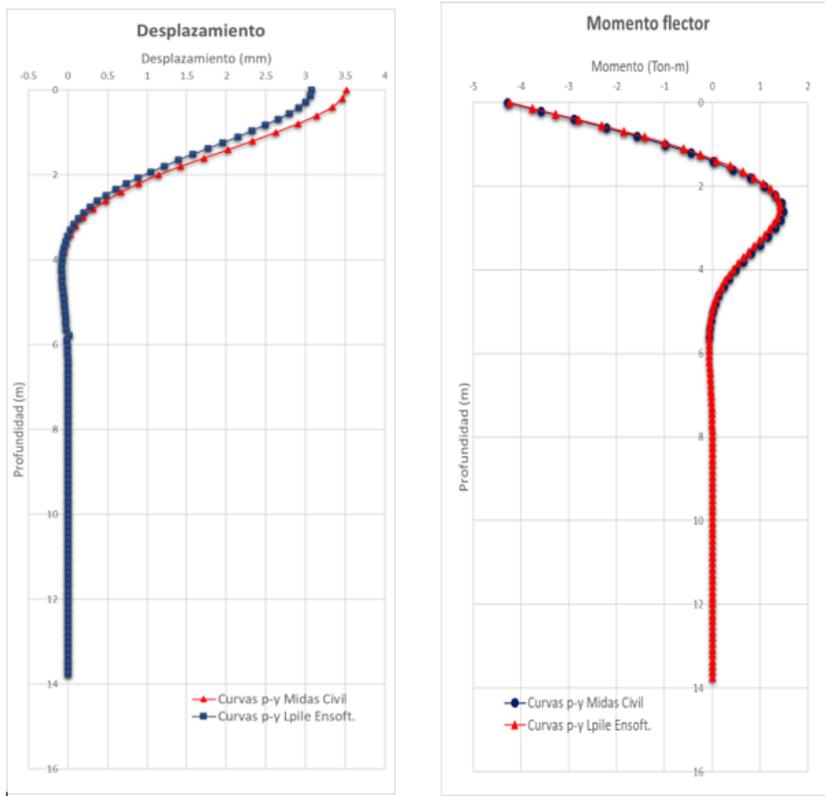


Figura VIII-22 Deformada de desplazamiento y momento flector del pilote modelado mediante curvas no lineales p-y en arena a distintas profundidades de la cota 0 a 13.75 m.

En la ~~Figura VIII-22~~ ~~Figura VIII-22~~ se observan los resultados obtenidos del Civil Midas y LPile de Ensoft para la misma formulación matemática presentando muy buen ajuste entre ambas.

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

#### VIII.4. Comparación resultados carga lateral

A continuación, se presenta la comparación de los resultados de desplazamiento y momento flector de los distintos métodos analíticos.

##### VIII.4.1. Deformada de desplazamiento del pilote

En la [Figura VIII-23](#) se muestra la comparación del diagrama de la deformada resultante según los métodos analíticos propuestos en el apartado VIII.3.

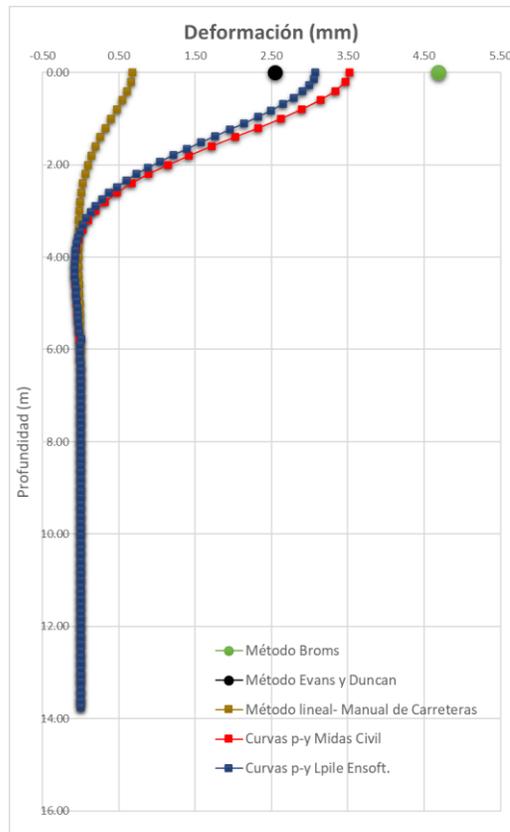


Figura VIII-23 Comparación de las deformaciones vs. profundidad del pilote en arena.

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

### VIII.5. Momento flector

En la siguiente ~~Figura VIII-24~~ ~~Figura VIII-24~~ se muestra el momento flector resultante del análisis del pilote, según los análisis lineales y no lineales para una carga lateral de 3.5 (Ton).

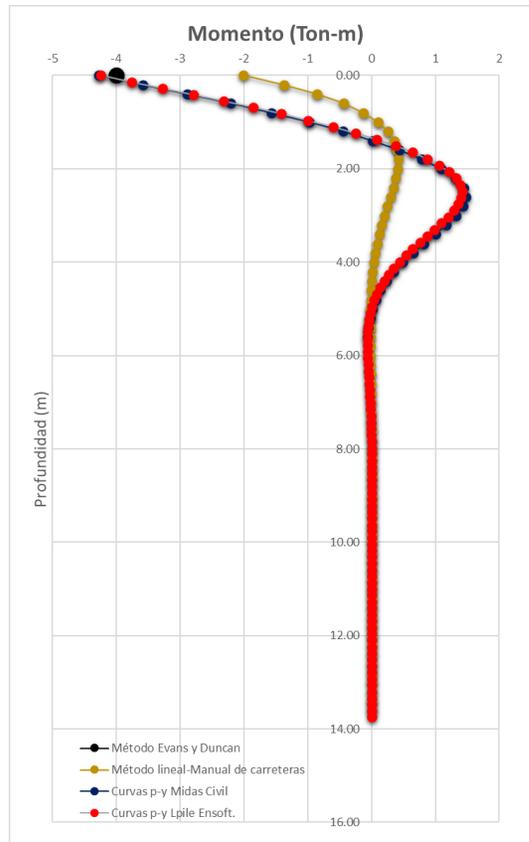


Figura VIII-24 Comparación del momento flector en el pilote restringido al giro.

La ~~Figura VIII-24~~ ~~Figura VIII-24~~ muestra que el momento resultante de un análisis lineal es inferior al esfuerzo resultante de un análisis no lineal.

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Color de fuente: Negro

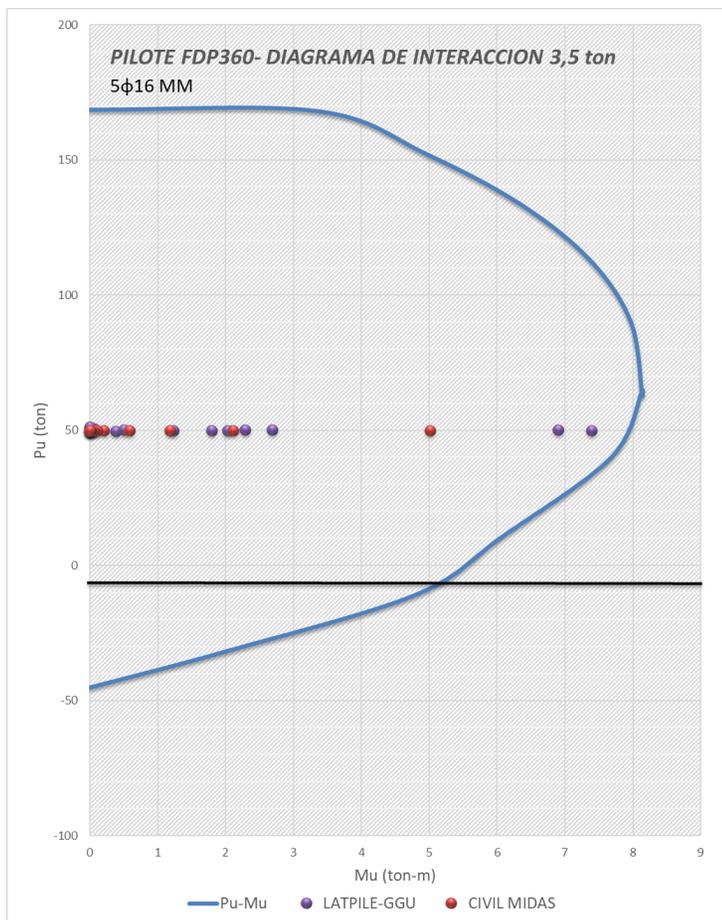
**Con formato:** Fuente: (Predeterminada) Times New Roman, 12 pto, Sin Negrita, Color de fuente: Negro, Revisar la ortografía y la gramática

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

**Con formato:** Fuente: Sin Negrita

### VIII.6. Diseño estructural del pilote

A continuación, se muestra el diagrama de interacción según ACI 318 calculado para un pilote sometido a una carga lateral de 3.5 (Ton).



La armadura longitudinal corresponde a la cuantía mínima exigida por el ACI 318 del 1%.  
Dado que el pilote está sometido a esfuerzos de flexo-compresión se considera una armadura longitudinal de 5 barras de  $\phi 16\text{mm}$ , y estribos  $\phi 6\text{mm}$  cada 15cm.

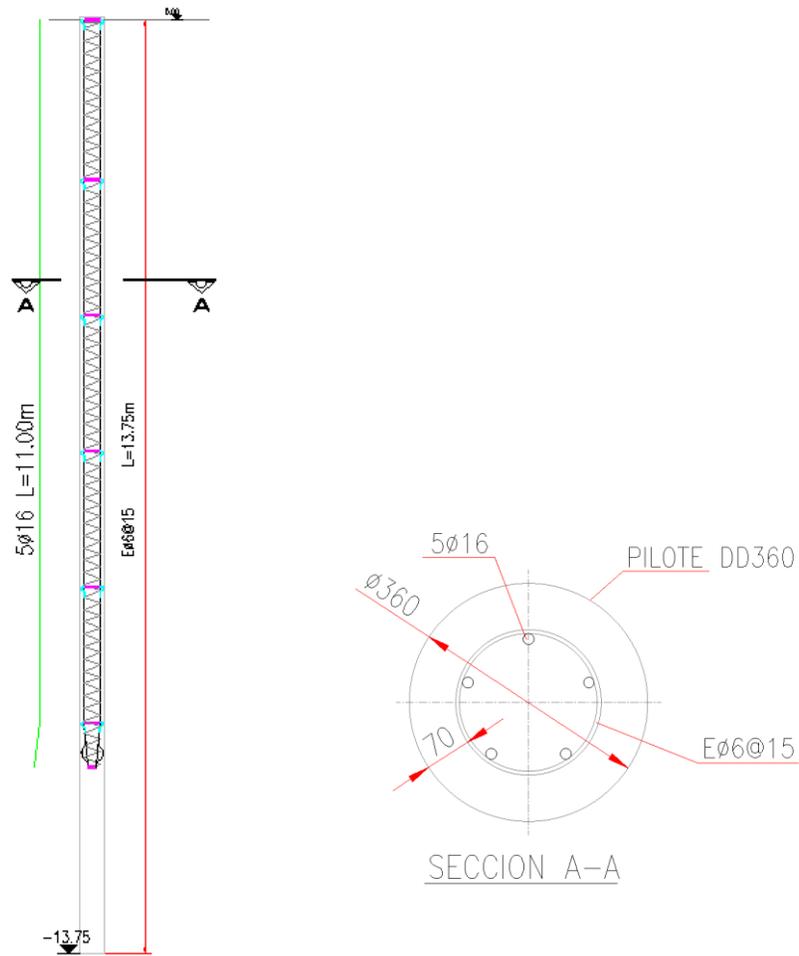


Figura VIII-26 Armadura longitudinal y transversal del pilote de desplazamiento total.

## **IX. CONCLUSIONES**

### **IX.1. Capacidad de carga última de pilotes**

1. Los análisis de capacidad de carga última mediante el ensayo experimental y los métodos analíticos propuestos muestran que al aumentar la longitud del pilote se incrementa la capacidad de carga última.
2. El sistema de pilotaje por desplazamiento total DD produce el confinamiento lateral del suelo a lo largo del fuste del pilote por lo que se incrementa las presiones horizontales produciendo una densificación del suelo circundante por lo tanto se incrementa la capacidad de carga por fuste en el pilote.
3. El método de Eslami y Fellenius (1997) muestra que existe una variabilidad entre el 10 y 25%. respecto a la capacidad de carga última del ensayo experimental, para los pilotes P1 y P5 muestra una capacidad mayor entre 24.7 y 10.37 % y en los pilotes P2, P3 y P4 una variación entre el 12.5 y 17.3%.
4. El método de NeSmith (2002) muestra que existe una variabilidad entre el -1 y el 19%. respecto al ensayo experimental, la capacidad de carga según el método analítico para los pilotes P1 y P5 muestra una capacidad mayor en un 19.3% y menor en -0.74% y en los pilotes de menor longitud P2, P3 y P4 una variación entre el -0.95 y 4%.
5. El método de la EAP-DIN EN 12699 (2014) muestra que existe una variabilidad importante respecto al ensayo experimental, según este método el pilote más largo P1 y el P5 presenta una capacidad mayor entre el 19% y 3.41%, en el caso de los pilotes de menor longitud P2, P3 y P4 la capacidad de carga experimental última subestima a la analítica en -1.33 a -9.52 %; por lo que para estos pilotes no se está sobreestimando la capacidad de carga.
6. Los métodos propuestos por NeSmith (2002) y la EAP-DIN EN 12699 (2014) presentan el mejor ajuste a la curva experimental. Para el pilote P1 los valores exceden la carga última en un 19.33% respecto a los dos métodos analíticos, por lo tanto, estos procedimientos analíticos no limitan los resultados por la capacidad estructural del pilote, ya que de acuerdo con el ensayo para la carga axial de 150 (Ton) y una longitud de 13.75 m, se produce la falla estructural en la cabeza del pilote.

7. Para el pilote P5, el método de la EAP-DIN 12699 (2014) excede la capacidad última de la curva experimental en un 3.41% y el método de NeSmith (2002) se encuentra aproximadamente 1% por debajo del valor de la capacidad última experimental por lo que presenta un valor más conservador, ya que de acuerdo al ensayo de carga última para la carga axial de 135 (Ton) y una longitud de 11.9 m, se produce la falla estructural en la cabeza del pilote.

8. Para los pilotes P2, P3 y P4, de acuerdo con los resultados obtenidos el método de NeSmith (2002) la capacidad excede entre 1-4% y el Método de EAP-DIN 12699 (2014) se encuentra por debajo entre 1-9.5% respecto al valor obtenido del ensayo de carga, por lo que la capacidad calculada mediante el Axpile GGU nos entrega valores conservadores de carga última. En estos pilotes no se llegó a la carga necesaria para producir la falla estructural en los pilotes.

9. De acuerdo con los análisis, los Métodos de NeSmith (2002) y la EAP-DIN EN 12699 (2014) se deduce que son los métodos que mejor se ajustan a los valores experimentales, por lo que el software Axpile GGU presenta una buena aproximación y se recomienda su utilización para este tipo de pilotes cuando presentan estas condiciones geotécnicas.

## **IX.2. Asentamiento de pilote cargado axialmente**

10. Con los tres métodos analíticos empleados se obtuvo un menor asentamiento en los pilotes más largos de 11.90 y 13.75 m de longitud. Esto se explica porque los pilotes de mayor longitud desarrollan mayor resistencia por fuste. La capacidad por fuste se desarrolla completamente con pequeñas deformaciones, normalmente de 10mm. En cambio, la capacidad por punta requiere que se produzcan deformaciones cercanas al 10% de su diámetro. Es decir que los pilotes de 11.90 y 13.75 m tienen menor asentamiento que los pilotes más cortos de 10.3 y 10.7 y 7.7 m, debido a su mayor capacidad por fuste.

11. Para generar las curvas carga vs. asentamiento se puede utilizar cualquiera de estos dos métodos Fellenius (1999) y la Función de transferencia Hiperbólica Chin ya que presentan una buena correlación entre sí.

### **IX.3. Capacidad de carga lateral**

12. El diseño de pilotes sometidos a carga lateral y el resultado de las deformaciones, está en función de las características elásticas del pilote, de las cargas aplicadas y de los parámetros del suelo.

13. El método lineal presentó menores desplazamientos y esfuerzos internos respecto a los métodos no lineales, por lo que esto nos puede llevar a cometer errores y obtener resultados contrarios a la seguridad, esto nos llevaría a armar el pilote con menores cuantías.

14. El software estructural Civil de Midas y el software geotécnico Lpile de Ensoft presentan muy buena correlación entre los desplazamientos y los esfuerzos internos. Son herramientas más modernas que nos permite modelar el comportamiento real del suelo considerando su comportamiento no lineal.

15. El método de Broms (1965), permitió calcular la resistencia última para pilotes largos, el cual depende del momento de fluencia del elemento estructural.

16. El método de Evans and Duncan (1982), presenta una muy buena aproximación respecto a los resultados obtenidos mediante el Civil Midas y el LPile Ensoft por lo que se recomienda su uso cuando no se cuente con una herramienta más sofisticada de cálculo.

## X. BIBLIOGRAFÍA

ACI-318 (2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. American Concrete Institute.

BAUER. (2013). FDP Full Displacement Pile System Process and equipment.

BASU, P. AND PREZZI, M. (2009) *Design and Applications of Drilled Displacement (Screw) Piles*, Publication FHWA/IN/JTRP-2009/28, Indiana Department of Transportation.

BERKEL & COMPANY CONTRACTORS, INC. Auger Pressure Grouted Piling. USA.

BRAJA M. DAS. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. 7th Edition, Cengage Learning Editores, S.A. de C.V., México.

BROMS, BENGT B. (1965). Design of Laterally Loaded Piles, *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 91, No. SM3, pp. 79-99.

BUSTAMANTE, M. AND GIANESELLI L. (1993) Design of Auger Displacement Piles from In Situ Tests. Deep Foundations on Bored and Auger Piles, *Proceedings of the Second International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, pp. 21-34.

BUSTAMANTE, M. AND GIANESELLI L. (1998) Installation Parameters and Capacity of Screwed Piles. Deep Foundations on Bored and Auger Piles. *Proceedings of the Third International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, pp. 95-108.

CAPUTO, V. (2003) Experimental Evidence for the Validation of Load – Settlement Predictions, *Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, pp. 205-300, W.F. Van Impe, Ed., Millpress, Rotterdam.

CARLOS JAVIER SAINEA VARGAS. (2011). Análisis de pilotes sometidos a carga de sismo, *Revista Facultad de Ingeniería UPTC*, pp. 9-21.

**Comentado [A53]:** Debes usar un formato consistente para citar. Revisar con Elena.

**Comentado [A54R53]:** Utilice el formato de Gutierrez.

**Comentado [A55]:** ¿De qué manera están ordenadas las referencias? No es alfabético ...

**Comentado [A56]:**

CHIN, F.K. (1970). Estimation of the Ultimate Load of Piles not Carried to Failure, *Proceedings of the second Southeast Asian Soil Conference in Soil Engineering*, pp. 80-90.

DAN A. BROWM, PH.D., P.E., STEVEN D. SAPP, PH.D., P.E., W. ROBERT THOMPSON, III, P.E., AND CARLOS A. LAZARTE, PH.D., P.E. (2007). Design and Construction of continuous Flight Auger Piles. *Geotechnical Engineering Circular (GEC) N°8*.

DE COCK F.A. (2009). Sense and Sensitivity of Pile Load - Deformation Behavior, *Deep Foundations on Bored and Auger Piles, BAP V*, pp. 23-44, W.F. Van Impe & P.O. Van Impe, Eds., Taylor & Francis.

DONALD P. CODUTO, WILLIAM A. KITCH, MAN-CHU RONALD YEUNG (2016). *Foundation Design Principles and Practices*. 3<sup>th</sup>. Edition, Pearson, USA.

DONALD P. CODUTO. (2001). *Foundation Design. Principles and Practices*. 2th Edition, Prentice Hall, New Jersey.

ESLAMI, ABOLFAZI, AND FELLENIUS, BENGT H. (1997). Pile Capacity by Direct CPT y CPTu Methods Applied to 102 Case Histories, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.34, pp. 886-904.

EVANS L.T. AND DUNCAN, J.M. (1982). Simplified Analysis of Laterally Loaded Piles, Report No. UCB/GT/82-04, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.

FELLENIUS, B.H. (1999). *Basic of Foundation Design*. 2th Edition, Bi Tech, Richmond, BC.

FELLENIUS, BENGT H. (1998). Recent Advances in the Design of Piles for Axial Loads, Dragloads, Drown drag, and Settlement, *ASCE and Port NY and NJ Seminar*.

FELLENIUS, B.H. (1991). Pile Foundations. *Foundation Engineering Handbook*. 2th HS Fang, Ed.

GERMAN GEOTECHNICAL SOCIETY. (2014). Recommendations on Piling (EA-Pfahle). Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Berlin, Alemania.

IFC CIMENTACIONES ESPECIALES. (2002). Sistema Omega Pilotes de Desplazamiento a rotación.

LYMON C. REESE AND WILLIAM F. VAN IMPE. (2001). Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading. London, Reino Unido.

LYMON C. REESE FOR FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. (2006). Handbook on Design of Piles and Drilled Shafts Under Lateral Load, Honolulu, Hawaii.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. (2018). Manual de carreteras Chile Vol.3 Instrucciones y criterios de diseño. Chile.

MONICA PREZZI. (2005). Overview of construction and design of Auger Cast-in-place and drilled displacement Piles.

NESMITH W. M. (2002). Static capacity analysis of augers, pressure-injected displacement piles. *Proceedings of the International Deep Foundations Congress 2002, Geotechnical Special Publication N° 116*. NESMITH W. M. (2003). Installation Effort as an Indicator of Displacement Screw Pile Capacity. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Geotechnical Seminar on Bored and Auger Piles*, pp. 177-184.

Con formato: Fuente: Times New Roman, 12 pto

PRASENJIT BASU, MONICA PRESSI, DIPANJAN BASU. (2005). Drilled Displacement Piles – Current Practice and Design, *DFI Journal Vol.4 N°1*.

PRASENJIT BASU Y MONICA PREZZI FHWA. (2009). Design and applications of Drilled Displacement Screw Piles, Indiana.

SOCIEDAD MEXICANA DE MECÁNICA DE SUELOS A.C. (2001). Manual de cimentaciones profundas. México D.F.

TRACY BRETTMANN, BERKEL & COMPANY CONTRACTORS, INC. (2012). New developments in auger Pressure Grouted APG Piles.

TRACY BRETTMANN AND WILLIE NESMITH. (2005). Advances in Auger Pressure Grouted Piles: Design, Construction and Testing. *Conference Geo-Frontier Congress*.

TRACY BRETTMANN P.E. (2004). New Trends in Auger Pressure Grouted Piles.

W. MORGAN NESMITH, P.E. (2015) Automated Monitoring Equipment for ACIP and DD Piles. Overland Park KS.

**ANEXOS**

## ANEXO A: SOLUCIÓN ELÁSTICA (1984)

Tabla de coeficientes adimensionales y esfuerzos internos del pilote.

Prof. (m)	Coeficientes adimensionales				Momento	Def.	Cortante
	A1	B1	C1	D1	M (Ton-m)	yz (mm)	V (Ton)
0.00	1.000	1.000	1.000	0.000	-2.013	0.676	3.500
0.50	0.860	0.315	0.587	0.273	-0.633	0.582	1.101
1.00	0.591	-0.050	0.270	0.320	0.100	0.399	-0.174
1.50	0.333	-0.190	0.071	0.262	0.383	0.225	-0.666
2.00	0.144	-0.203	-0.029	0.173	0.408	0.097	-0.709
2.50	0.029	-0.158	-0.065	0.094	0.318	0.020	-0.554
3.00	-0.026	-0.101	-0.063	0.037	0.203	-0.018	-0.353
3.50	-0.043	-0.052	-0.047	0.005	0.105	-0.029	-0.182
4.00	-0.039	-0.019	-0.029	-0.010	0.038	-0.027	-0.066
4.50	-0.028	0.000	-0.014	-0.014	0.001	-0.019	-0.001
5.00	-0.017	0.007	-0.005	-0.012	-0.015	-0.011	0.026
5.50	-0.008	0.009	0.001	-0.008	-0.018	-0.005	0.031
6.00	-0.002	0.007	0.003	-0.005	-0.015	-0.001	0.026
6.50	0.001	0.005	0.003	-0.002	-0.010	0.001	0.017
7.00	0.002	0.003	0.002	0.000	-0.005	0.001	0.009
7.50	0.002	0.001	0.001	0.000	-0.002	0.001	0.004
8.00	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001
8.50	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	-0.001
9.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	-0.001
9.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	-0.001
10.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001
10.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13.50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13.75	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ANEXO B: Curvas p-y en arenas según Reese y Van Impe (2001).

Profundidad z(m)	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	10.000	11.000	12.000	13.000	14.000
$K_0 \cdot z \cdot \tan^2 \phi \cdot \sin \beta$	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000	2.200	2.400	2.600	2.750
$\tan(\beta - \phi) \cdot \cos \alpha$	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558	0.558
$\tan(\beta)$	1.732	1.732	1.732	1.732	1.732	1.732	1.732	1.732	1.732	1.732	1.732	1.732	1.732	1.732
$\tan(\beta - \phi)$	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577
$b \cdot z \cdot \tan \beta \cdot \tan \phi$	0.824	1.288	1.752	2.216	2.681	3.145	3.609	4.073	4.537	5.001	5.465	5.929	6.393	6.741
$K_0 \cdot z \cdot \tan \beta \cdot \tan^2 \phi \cdot \sin \beta \cdot \tan \alpha$	0.161	0.322	0.482	0.643	0.804	0.965	1.125	1.286	1.447	1.608	1.768	1.929	2.090	2.211
$K_0 \cdot b$	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120
$\tan^2 \phi(\beta)$	81.000	81.000	81.000	81.000	81.000	81.000	81.000	81.000	81.000	81.000	81.000	81.000	81.000	81.000
$\tan \phi$	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577
$\tan^2 \alpha(\beta)$	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000
$P_{s1}$	28.143	93.755	196.836	337.387	515.408	730.897	983.857	1274.285	1602.183	1967.550	2370.387	2810.683	3288.469	3671.380
$P_{s2}$	101.413	202.826	304.238	405.651	507.064	608.477	709.890	811.302	912.715	1014.128	1115.541	1216.954	1318.367	1398.426
$P_{s3}$	28.143	93.755	196.836	337.387	507.064	608.477	709.890	811.302	912.715	1014.128	1115.541	1216.954	1318.367	1398.426
$y_{u=3\beta/80}$	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
$A_c$	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700
$p_{u=4c^*/\beta}$	19.70	65.63	137.79	236.17	354.94	425.93	496.92	567.91	638.90	709.89	780.88	851.87	922.86	976.10
$y_{m=1/60}$	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
$B_c$	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
$P_m$	16.89	56.25	118.10	202.43	304.24	365.09	425.93	486.78	547.63	608.48	669.32	730.17	791.02	836.66
$k$	16300.00	16300.00	16300.00	16300.00	16300.00	16300.00	16300.00	16300.00	16300.00	16300.00	16300.00	16300.00	16300.00	16300.00
$p$	16300.00	32600.00	48900.00	65200.00	81500.00	97800.00	114100.00	130400.00	146700.00	163000.00	179300.00	195600.00	211900.00	224250.00
$m=(p_u-p_m)/(y_{u=3\beta/80})$	375.24	1250.06	2624.48	4498.50	6760.85	8113.02	9465.20	10817.37	12169.54	13521.71	14873.88	16226.05	17578.22	18592.35
$n=P_m/(m \cdot y_m)$	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50
$C_0 P_m / (m \cdot L / n)$	33.40	111.27	233.62	400.43	601.81	722.17	842.54	962.90	1083.26	1203.62	1323.99	1444.35	1564.71	1654.98
$L/n$	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
$y_e=(C_0/k^*)^{1/n-1}$	0.00079	0.00142	0.00210	0.00281	0.00347	0.00347	0.00347	0.00347	0.00347	0.00347	0.00347	0.00347	0.00347	0.00347
$p_k=k^* \cdot y_e \cdot k$	12.89	46.44	102.67	182.92	282.82	339.38	395.95	452.51	509.07	565.64	622.20	678.76	735.33	777.75