

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ANÁLISIS COMPARATIVO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE UN PILOTE DE  
ACERO SOMETIDO A CARGA HORIZONTAL**

Tesis para obtener el título profesional de **Ingeniero Civil**:

**AUTORES:**

**PATRICIO GONZALO SANCHEZ FARFAN**

**MARIO ANDRÉS PEÑA CAMERANO**

**ASESOR: MARKO ANTONIO LÓPEZ BENDEZÚ**

**Lima, diciembre del 2020.**

## RESUMEN

Un pilote se ve afectado por diferentes sollicitaciones de cargas (vertical, horizontal y momentos). La investigación analiza un pilote bajo una carga horizontal con los métodos analíticos/numéricos y un ensayo de campo. El ensayo para analizar comportamiento experimental fue realizado en Chilca, donde el ensayo de carga a escala real proporciona una base sólida para la comprensión del problema. El pilote cilíndrico, de acero A572 grado 50 de 24" de diámetro ( $\frac{1}{2}$ " de espesor). La profundidad enterrada del pilote es de 8.80 m y la carga lateral se aplica a una distancia de 0.40 m de la superficie.

El ensayo siguió los lineamientos de la norma ASTM D3966. La caracterización geotécnica del sitio fue realizada en conjunto con la empresa. Con los ensayos de campo SPT y refracción sísmica se obtuvieron las propiedades mecánicas del suelo. Las propiedades del pilote de acero son conocidas por tratarse de un acero normalizado. Con estos datos se realizaron los análisis.

Los cálculos analíticos y numéricos se compararon con las mediciones experimentales a través de gráficas de desplazamientos y momentos flexionantes a lo largo del pilote. El método de curvas  $p$ - $y$  (Matlock y Reese) proporciona resultados aproximados y modela adecuadamente la distribución de cargas laterales y desplazamientos del pilote. El Método de Elementos Finitos (MEF) con el programa comercial Abaqus® se usa como herramienta para solucionar el problema. El modelo constitutivo elastoplástico de Mohr Coulomb es usado para analizar el comportamiento del suelo. El MEF modela la interacción suelo-pilote y simula aceptablemente bien el desplazamiento del pilote bajo la acción de la carga lateral. Finalmente, fue realizado un análisis paramétrico con el fin de conocer la influencia de los parámetros del suelo y pilote para entender mejor las respuestas del problema.

**Palabras clave:** Ensayo de carga horizontal estática, pilote de acero, método pseudoestático,  $p$ - $y$ , análisis numérico, análisis paramétrico.

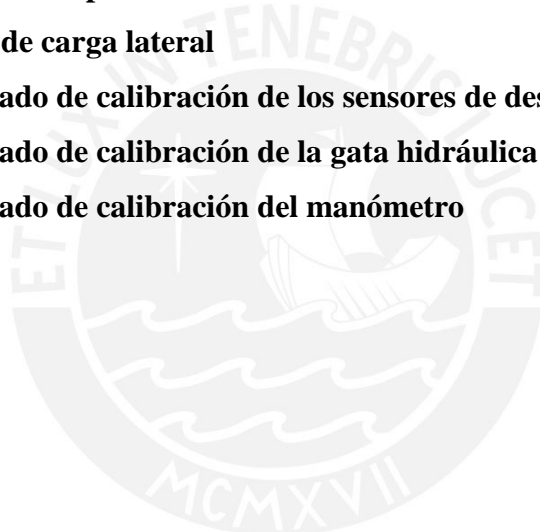
# Índice

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Generalidades.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Justificación.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Hipótesis .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4. Objetivos.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Marco Teórico.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Introducción .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Ensayos de campo realizados.....</b>	<b>5</b>
2.2.1. Ensayo SPT.....	5
2.2.2. Ensayo de refracción sísmica.....	6
<b>2.3. Parámetros del suelo.....</b>	<b>7</b>
2.3.1. Velocidad de onda cortante .....	7
2.3.2. Angulo de fricción .....	8
2.3.3. Peso específico.....	8
2.3.4. Módulo de elasticidad.....	9
2.3.5. Coeficiente de poisson .....	9
2.3.6. Coeficiente de presión lateral .....	9
2.3.7. Módulo de reacción del suelo .....	10
2.3.8. Constante de proporcionalidad .....	10
<b>2.4. Cálculo de la resistencia última para pilotes cargados lateralmente .....</b>	<b>11</b>
2.4.1. Métodos estáticos.....	11
2.4.2. Uso de curvas <i>p-y</i> .....	14
2.4.3. Antecedentes del método de los elementos finitos .....	16
<b>2.5. Prueba de carga lateral en pilotes .....</b>	<b>18</b>
<b>3. Caracterización geotécnica .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1. Ubicación .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2. Geología .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3. Programa de exploración.....</b>	<b>23</b>
<b>3.4. Ensayos realizados .....</b>	<b>23</b>
3.4.1. Ensayo SPT.....	23
3.4.2. Ensayos de laboratorio.....	25
3.4.3. Ensayo de refracción sísmica.....	26
<b>3.5. Parámetros geotécnicos .....</b>	<b>28</b>
<b>4. Análisis por el método de pseudoestático y el método <i>p-y</i> .....</b>	<b>33</b>

<b>4.1. Aspectos generales del diseño .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2. Análisis por el método pseudoestático .....</b>	<b>33</b>
4.2.1. Resultados del método de pseudoestático.....	33
4.2.2. Limitaciones del resultado.....	35
<b>4.3. Análisis por el método <math>p</math>-<math>y</math> .....</b>	<b>35</b>
4.3.1. Resultados del método $p$ - $y$ .....	36
4.3.2. Limitaciones del resultado.....	38
<b>5. Análisis numérico .....</b>	<b>39</b>
<b>5.1. Geometría del modelo y propiedades de los materiales .....</b>	<b>39</b>
<b>5.2. Interacción de suelo-pilote .....</b>	<b>39</b>
<b>5.3. Condiciones de contorno .....</b>	<b>39</b>
<b>5.4. Discretización de los elementos.....</b>	<b>40</b>
<b>5.5. Asignación de la carga y simulación numérica. ....</b>	<b>40</b>
<b>6. Análisis del ensayo de carga lateral .....</b>	<b>42</b>
<b>6.1. Instalación e instrumentación.....</b>	<b>42</b>
<b>6.2. Prueba de Carga Dinámica (PDA).....</b>	<b>43</b>
<b>6.3. Resultados del ensayo .....</b>	<b>44</b>
<b>7. Análisis paramétrico .....</b>	<b>49</b>
<b>7.1. Análisis mediante el método <math>p</math>-<math>y</math> .....</b>	<b>49</b>
7.1.1. Longitud (L).....	49
7.1.2. Parámetros geomecánicas.....	50
<b>7.2. Análisis mediante el método estático.....</b>	<b>51</b>
7.2.1. Falla del pilote por fluencia – Método de Broms .....	51
7.2.2. Falla del pilote – Método de Meyerhoff .....	52
7.2.3. Falla del suelo.....	53
<b>7.3. Análisis mediante el modelo numérico.....</b>	<b>54</b>
7.3.1. Influencia del diámetro del terreno.....	55
7.3.2. Influencia del módulo de elasticidad del acero.....	55
7.3.3. Influencia del módulo de elasticidad del suelo.....	55
7.3.4. Influencia del ángulo de fricción .....	56
7.3.5. Influencia de la dilatación.....	56
7.3.6. Influencia del peso específico.....	56
7.3.7. Influencia del módulo de poisson.....	57
<b>8. Discusión de los resultados .....</b>	<b>58</b>
<b>8.1. Comparación de los tres métodos de análisis .....</b>	<b>58</b>



<b>8.2. Recomendaciones</b> .....	<b>59</b>
8.2.1. Método pseudoestático .....	59
8.2.2. Método p-y.....	59
8.2.3. Modelo numérico.....	60
8.2.4. Prueba de carga lateral.....	60
<b>9. Conclusiones</b> .....	<b>62</b>
<b>10. Bibliografía</b> .....	<b>63</b>
<b>Anexos</b>	
<b>Anexo 1 – Resultados SPT</b>	
<b>Anexo 2 – Informe MASW</b>	
<b>Anexo 3 – Protocolos de ensayo PDA</b>	
<b>Anexo 4 – Protocolos de pilotes hincados</b>	
<b>Anexo 5 – Prueba de carga lateral</b>	
<b>Anexo 6 – Certificado de calibración de los sensores de desplazamiento</b>	
<b>Anexo 7 – Certificado de calibración de la gata hidráulica</b>	
<b>Anexo 8 – Certificado de calibración del manómetro</b>	



## Lista de Figuras

Figura 2.1: Esquema de ensayo SPT (Alva, 2017) .....	6
Figura 2.2: Esquema de refracción sísmica (Cahpman, 2004).....	6
Figura 2.3: Proceso de obtención del perfil de velocidad de ondas de corte (Cahpman, 2004) .....	7
Figura 2.4: Diagrama de cuerpo libre pilote rígido (Poulos, 1980) .....	12
Figura 2.5: Funciones de reacción (Zhang, 2005) .....	12
Figura 2.6: DCL (Zhang, 2005) .....	14
Figura 2.7: Un pilote de longitud L totalmente incrustado en el suelo y actuado por cargas Q y M; (a) Deflexión; (b) Giro, $dy/dx$ ; (c) Momento, $EI (d^2y/dx^2)$ ; (d) Corte, $EI(d^3y/dx^3)$ ; (e) Reacción del suelo $EI(d^4y/dx^4)$ (Reese and Matlock, 1956).....	14
Figura 2.8: Deformación del pilote (Reese and Matlock, 1956).....	16
Figura 2.9: Estratos del suelo caracterizados (Khodair y Abdel, 2014).....	16
Figura 2.10: Sección de pilote (Khodair y Abdel, 2014) .....	17
Figura 2.11 Momento flector vs Profundidad (Khodair y Abdel, 2014).....	17
Figura 2.12: Arreglo típico para ensayar dos pilotes simultáneamente (viga/peso muerto, pilote, pistón, cilindro hidráulico, pilote y viga/peso muerto) .....	18
Figura 2.13: Mecanismos de Reacción (ASTM, 2013).....	18
Figura 2.14: (a) Deformímetro digital y (b) Manómetro: Mecanismos de medición de presiones.....	19
Figura 2.15: Prueba de carga lateral en un grupo de pilotes hincados en arcilla y limo blando y esquema de grupo de pilotes con fila delantera, media y trasera (Rollins et al., 1998) .....	19
Figura 3.1: Ubicación del Almacén PSV Chilca en el mapa .....	21
Figura 3.2: Mapa Geológico del valle de Chilca (INGEMMET, 2002) .....	22
Figura 3.3: Ensayo SPT en Chilca .....	23
Figura 3.4: Resultados del ensayo SPT corregidos y promedios por estrato .....	24
Figura 3.5: Vista general del tendido del cable refracción y posicionamiento de geófonos .....	26
Figura 3.6: Generación de la energía sísmica para el ensayo MASW .....	26
Figura 3.7: Perfil sísmico línea LS-01 .....	27
Figura 3.8: Velocidad de onda de corte vs Profundidad MASw.....	27
Figura 3.9: a) Peso específico vs profundidad; b) Velocidad de onda cortante vs profundidad (Mayne y MASw).....	28
Figura 3.10: Ángulo de fricción en función de la profundidad.....	28
Figura 3.11: Módulo de Poisson en función de la profundidad .....	29
Figura 3.12: Módulo de Elasticidad en función de la profundidad.....	29
Figura 3.13: Módulo de reacción $K_h$ en función de la profundidad .....	31
Figura 4.1: Diagrama de momento curvatura (ETABS, 2019) .....	33
Figura 4.2: Deflexión Broms (Das, 2019).....	33

Figura 4.3: Geometría del pilote (GEO5, 2019) .....	35
Figura 4.4: a) Esfuerzo vs deformación b) Puntos notables de la gráfica.....	35
Figura 4.5: Resultados de módulo de reacción ( $K_h$ ), desplazamiento, fuerza cortante y momento con función a la profundidad (GEO5, 2019) .....	36
Figura 5.1: a) Configuración del problema b) Modelo en ABAQUS. ....	37
Figura 5.2: Condiciones de contorno empleado en el modelo (ABAQUS, 2019).....	38
Figura 5.3: (ABAQUS, 2019) .....	38
Figura 5.4: Enmallado vista isométrica (ABAQUS, 2019).....	38
Figura 5.5: Aplicación de la carga (ABAQUS, 2019) .....	39
Figura 5.6: Campos de desplazamiento (ABAQUS, 2019) .....	39
Figura 5.7: a) Fuerza vs Desplazamiento, b) Deformada del pilote.....	39
Figura 6.1: Esquema de la instalación del ensayo de carga lateral. ....	40
Figura 6.2: Instrumentación de la prueba de carga: a) deformímetros digitales (lectura de desplazamientos) y b) pistón de conexión y cilindro hidráulico.....	41
Figura 6.3: Mecanismo de Reacción (grúa). ....	41
Figura 6.4: Instrumentación de la prueba de carga: (a) Dial de deformación 6 (b) Diales de deformación 1, 2 y 3 (c) Diales de deformación 4 y 5 .....	43
Figura 6.5: a) Carga vs desplazamientos y b) Carga vs desplazamiento promedio (Dial 01, Dial 02 y Dial 03) .....	44
Figura 6.6: a) Desplazamientos vs profundidad en carga b) Desplazamientos vs profundidad en descarga .....	45
Figura 7.1 Longitud vs desplazamiento .....	47
Figura 7.2 Longitud critica vs $R_m$ .....	47
Figura 7.3: Carga última del pilote en función de diferentes parámetros – Método de Broms .....	48
Figura 7.4: Relación entre carga ultima, $P_m$ y longitud – Método de Meyerhoff .....	49
Figura 7.5: Relación entre carga ultima, $P_m$ y eficiencia del pilote – Método de Meyerhoff .....	50
Figura 7.6: Relación entre carga última y Ángulo de fricción.....	50
Figura 7.7: Relación entre carga última y Longitud .....	50
Figura 7.8: Relación entre carga última y Diámetro.....	51
Figura 8.1: Comparacion: Carga vs Desplazamiento.....	54

## Lista de Tablas

Tabla 2.1: Fórmulas de Velocidad de Onda Cortante.....	7
Tabla 2.2: Coeficiente de Fricción.....	8
Tabla 2.3: Módulo de Elasticidad (secante y de mediana deformación) .....	9
Tabla 2.4: Módulo de reacción del suelo .....	10
Tabla 2.5: Módulo de proporcionalidad del suelo .....	11
Tabla 2.6: Función de reacción.....	12
Tabla 2.7: Solución del pilote de comportamiento rígido (Hu) .....	13
Tabla 2.8: Solución pilote de comportamiento flexible.....	13
Tabla 2.9: Procedimientos de ensayos para pilotes cargados lateralmente (ASTM 3966, 2013) .....	17
Tabla 3.1: Resultados SPT.....	23
Tabla 3.2: Resultados Ensayo MASw.....	24
Tabla 3.3: Resultados de laboratorio de suelos.....	25
Tabla 3.4: Promedios de: granulometría, propiedades gravimétricas y volumétricas por estratos .....	25
Tabla 3.5: Resumen de Parámetros del suelo por estrato.....	30
Tabla 3.6: Datos del pilote .....	30
Tabla 3.7: Módulo de reacción .....	30
Tabla 4.1: Cálculo del promedio de los parámetros geomecánicos.....	32
Tabla 4.2: Parámetros geométricos del pilote.....	32
Tabla 4.3: Propiedades del acero (ASTM, 2018).....	33
Tabla 4.4: Resultados de los métodos estáticos .....	34
Tabla 4.5: Propiedades del acero (ETABS, 2019).....	35
Tabla 4.6: Módulo de reacción del suelo .....	35
Tabla 4.7: Resumen de resultados (GEO5, 2019).....	36
Tabla 5.1: NAVFAC (Foundation and Earth Structures, U.S. Department of the Navy, 1984).....	37
Tabla 6.1: Resultados del ensayo de carga lateral.....	43
Tabla 6.2: Resultados promedio (Dial 01, Dial 02 y Dial 03) del ensayo de carga lateral .....	44
Tabla 6.3: Resultados del ensayo de carga lateral a diferentes profundidades (-1m y -2m).....	45
Tabla 7.1 Parámetros del suelo y del pilote .....	46
Tabla 7.2: Influencia de la longitud en la respuesta del pilote.....	46
Tabla 7.3: Comparación de las respuestas .....	47
Tabla 7.4: Diámetro del terreno vs desplazamiento.....	51
Tabla 7.5: Módulo de elasticidad del acero vs desplazamiento.....	52
Tabla 7.6: Módulo de elasticidad del suelo vs desplazamiento .....	52
Tabla 7.7 Angulo de fricción vs desplazamiento .....	52
Tabla 7.8: Dilatancia vs desplazamiento.....	53

Tabla 7.9: Peso específico vs desplazamiento .....	53
Tabla 7.10: Módulo de Poisson vs desplazamiento .....	53
Tabla 8.1: Influencia del costo del ensayo respecto al costo del hincado .....	57



# 1. Introducción

## 1.1. Generalidades

Hoy en día el área de la ingeniería geotécnica se encuentra en pleno auge. El proceso de las cimentaciones es uno de los más importantes en las obras civiles. Puede conllevar a tener un gran ahorro en la construcción si se diseña correctamente la cimentación del proyecto, ya que se ven muchos casos en los que varios tipos de proyectos fallan por las cimentaciones o se asientan más de lo que deberían debido a un mal o pobre estudio del suelo el cual conlleva a realizar un mal cálculo de la cimentación y estos errores elevan el costo del proyecto.

El elemento estructural que transfiere una carga al suelo se denomina cimentación. Para cualquier proyecto que requiera diseño y la construcción de cimientos, la primera pregunta que se debe responder es si es que necesita una cimentación superficial o profunda (Das, 2011). Las cimentaciones profundas son utilizadas cuando el suelo, que va a recibir la carga transmitida de toda la estructura, no es suficientemente resistente, por lo que es necesario transmitir las cargas a un suelo o roca con mayor resistencia.

La elección final del tipo de pilote para cualquier trabajo está dictada por las condiciones del subsuelo, las características de transmisión de cargas de los pilotes, el rendimiento probable de la cimentación y por la economía (Peck et al., 1973). Para efectos de este estudio, se toma un pilote hincado de acero, que se trabaja en arena y el comportamiento de un pilote hincado es mejor que el de uno pre-excavado al trabajar en dicho suelo, teniendo en cuenta que el pilote hincado es más económico que el pre-excavado. El último conlleva a alquilar maquinaria más especializada, además de contar con una tubería especial para el vaciado del concreto (tremie) y la limpieza del terreno, teniendo en cuenta que se tiene que eliminar el material excavado.

El uso de pilotes generalmente se da cuando hay que resistir una carga vertical, pero existen otros casos en donde la carga horizontal toma importancia como, por ejemplo: las olas del mar, la fuerza horizontal del viento y los altos esfuerzos en las zonas de riesgo sísmico. Estas sollicitaciones, que producen cargas laterales importantes que pueden llegar a comprometer el diseño del pilote, normalmente se encuentran en edificios altos, bases de puentes, estructuras de contención, torres de energía eléctrica, estructuras off-shore, entre otras.

Se debe de tener en cuenta siempre que la carga lateral debe ser calculada, así como el desplazamiento lateral que genera dicha sollicitación, por lo que existen dos criterios para determinar la carga lateral permisible de un pilote, según el factor de seguridad aceptado. Estos son:

- Mediante la obtención de la carga última (falla).
- Mediante la obtención del desplazamiento lateral admisible.

Se escoge el menor de los valores anteriores hallados, debido a que es el que se adapta, más adecuadamente, a la carga lateral de diseño, al ser el más crítico (Prakash y Sharma, 1990). Cada uno

de estos dos criterios se basa en diferentes métodos para calcular la resistencia lateral; el de Brinch Hansen y el de Broms. Por otra parte, para el desplazamiento lateral permisible se utiliza el de Reese y Matlock y el de Poulos.

Debido a que siempre existen ciertos factores reales que pueden influir cuando se efectúan los cálculos teóricos con la información geotécnica del suelo, siempre es importante realizar ensayos de carga para determinar la capacidad real del pilote. Esto porque la teoría puede dar la solución de un pilote, en muchas ocasiones, sobredimensionado, al utilizar factores de seguridad altos en el diseño de las cimentaciones.

Durante mucho tiempo el método usual de llevar a cabo el ensayo de carga lateral fue el de instalar un par de pilotes y aplicar carga para separar sus cabezas. Una descripción del método es dada por Wagner (1953). Los pilotes deben ser colocados lo suficientemente lejos para no obtener una interacción significativa entre los movimientos de cada pilote (Poulos y Davis, 1980). Este procedimiento al ser muy aleatorio, se modificó por Alizadeh y Davisson (1970), de tal manera de que se aplica una carga horizontal progresivamente por medio de un cilindro hidráulico, para luego medir los desplazamientos laterales del eje del pilote a cierta profundidad, pero el mecanismo de reacción ya no será un pilote, sino un peso muerto, el cual evite deformaciones y así tener un ensayo más preciso (Prakash y Sharma, 1990).

En la presente tesis se busca evaluar la respuesta de un pilote de acero, hincado en arena, cargado lateralmente, ubicado en Chilca, teniendo en cuenta los métodos aplicables a un pilote cargado lateralmente, en un suelo arenoso, para luego comparar los resultados con el ensayo realizado en campo.

## **1.2. Justificación**

En el medio existe gran cantidad de suelos problemáticos, los cuales presentan dificultades para soportar las grandes cargas tanto verticales y horizontales a las que se les solicita, por lo que se buscan nuevas formas de cimentación. Los pilotes que son parte de las cimentaciones profundas, se presentan como una alternativa de solución frente a esta problemática.

El Perú es un país con alto riesgo sísmico, entonces una edificación, al vibrar, generara una fuerza inercial sobre la cimentación, por lo que no existe edificación en el Perú cuyos cimientos no se vean afectados por cargas horizontales generadas por el sismo.

La geografía que tenemos presenta relieve accidentado lo que hace muy probable que los estratos no sean totalmente horizontales. Por otra parte, cuando la cimentación se encuentra en un estrato inclinado se presentan esfuerzos horizontales adicionales en el pilote, generado por el empuje del suelo.

Entonces se podrían clasificar los tipos de fuerzas horizontales en dos: Primero, el tipo de fuerza horizontal que es aplicada en la cara de interacción pilote estructura, que puede provenir de un movimiento sísmico o simplemente ser la cortante que recibe en la base de la edificación. El segundo tipo de carga horizontal es el que transfiere directamente el suelo al cimiento y puede ser de naturaleza estática que es el caso de un estrato inclinado donde se presentan cargas horizontales adicionales o el caso de naturaleza dinámica que serían los sismos ya que el suelo se moverá con diferente frecuencia

que el pilote, generando esfuerzos que podrían ser de gran importancia.

Las cargas horizontales entonces representan una parte fundamental para el correcto análisis y futuro diseño de la cimentación. Un mal análisis puede llevar a una estructura al colapso o al sobredimensionamiento, debido a esto han sido propuestos diferentes métodos y modelos en el desarrollo de este tema.

Las respuestas de las solicitaciones horizontales varían de método a método, por lo que la labor de este trabajo yace en una buena comprensión de los mismos y en su respectiva comparación para así determinar cuál se adecúa más a las necesidades del proyecto.

Frente a las condiciones propuestas, se determina que los ensayos de carga de los pilotes se dan por las siguientes razones: Para probar de que la falla no ocurre antes que las solicitaciones del pilote, obteniendo un mejor factor de seguridad. Para determinar la capacidad de carga última y compararla con los valores teóricos. Para determinar los desplazamientos y asentamientos admisibles del pilote en la región donde está la carga actuante. Y finalmente para indicar la rigidez estructural del pilote (Poulos y Davis, 1980).

Los ensayos de carga lateral miden los desplazamientos horizontales, según las cargas aplicadas, para obtener cargas últimas y desplazamientos admisibles. Dichos ensayos están siendo utilizados mundialmente con una mayor frecuencia en los proyectos de gran envergadura, por lo que se está estimando un incremento en la demanda del mismo, siempre teniendo en cuenta las dimensiones del pilote (diámetro y longitud).

La prueba de carga lateral fue propuesta hace varias décadas atrás, sin embargo, existe una problemática amplia acerca de dicho ensayo, debido a que en el Perú no se tiene mucha investigación, y en el mundo se tienen muy pocos resultados con respecto a la obtención de carga lateral (Prakash y Sharma 1990).

### **1.3. Hipótesis**

Los valores de los desplazamientos laterales, así como el de la carga última, con el método pseudoestático y  $p-y$  son imprecisos debido a que determinar los parámetros reales del suelo es prácticamente imposible. Esto se debe a que los ensayos realizados al suelo no son del todo precisos debido a la heterogeneidad del suelo.

Se espera que en el análisis paramétrico existan grandes diferencias entre los valores del diámetro y espesor, pero que los valores de la longitud del pilote no influyan debido a que a cierta profundidad el suelo absorbe toda la energía dada a la hora de cargar el pilote.

### **1.4. Objetivos**

En un marco general, el objetivo es el de realizar un análisis comparativo, a un pilote hincado de acero, entre las fórmulas analíticas, un modelo numérico y un ensayo de carga lateral, para la obtención del desplazamiento lateral y carga última, y así analizar cuanto varía la teoría frente a la realidad.

En un plano específico, se pueden tener en cuenta los siguientes objetivos:



- La tesis busca documentar un ensayo de carga lateral, de un pilote de acero de 8.8 metros de profundidad enterrada, circular de pared delgada con un diámetro de 24" y con un espesor de ½". En la documentación se muestra la relación que existe entre la deformación horizontal y la fuerza horizontal. La fuerza se aplicará a 0.40 metros del suelo.
- En la documentación no solo se ve la deformación del pilote en la zona donde se aplica la carga sino también se aprecia la deformación a 1 m de profundidad y a 2 m, para poder obtener la deformada del pilote y compararlo con lo que dice la teoría.
- Estimar la carga de rotura permisible a partir de la gráfica obtenida mediante el procesamiento de los datos del ensayo de carga lateral y compararla con los resultados obtenidos por los otros tres métodos.
- Comparar las deflexiones máximas según los diferentes métodos y observar su variación con respecto al ensayo.
- De la misma manera, se busca identificar cuáles son los parámetros de mayor influencia en cada uno de los métodos, que se desarrollaron mediante un análisis paramétrico. Se busca demostrar que al existir posibles tipos de falla; tal como la del pilote o del suelo, existen parámetros que aumentan la resistencia a uno de éstos tipos de falla.
- Se busca tener en cuenta la maximización de los recursos para no sobredimensionar los pilotes y así obtener una mejor eficiencia en términos de seguridad, economía y calidad.
- Esta tesis trata de aportar en la validez de los métodos numéricos siendo una prueba más de su capacidad, con lo cual se puede desarrollar de mejor manera la práctica del uso de software especializados en geotecnia, que cada vez se hace más popular. Se busca fomentar el uso de estos programas.

## **2. Marco Teórico**

### **2.1. Introducción**

Un pilote es utilizado cuando el estrato de suelo que debe de soportar las cargas transmitidas por la estructura, se encuentra a una profundidad considerable, por debajo de otro u otros estratos, donde sería más rápido y económico el uso de pilotes en vez del uso de zapatas (Rajapapakse, 2008). Los pilotes se definen en tres etapas que son las de diseño, construcción y control de calidad. Para asegurarse de que los pilotes cumplan con las solicitaciones de la estructura que va a soportar, se le realizan ensayos estáticos o dinámicos para que puedan determinar la resistencia axial y lateral.

La presente tesis se enfoca en la carga lateral de un pilote, por lo que en este capítulo se presentan los principios básicos de la teoría de Broms y  $p-y$ , así como también el análisis por el método de elementos finitos. Finalmente se explica la prueba de carga lateral en el pilote siguiendo los lineamientos de la norma ASTM 3966-07

Las etapas de un ensayo de carga lateral involucran:

- Carga: La manera en que se va a aplicar la carga, ya que en el acápite 2.5 se verán los distintos tipos de ensayos de carga lateral, los cuales varían por la manera en la que la carga es aplicada.
- Registro de lecturas del ensayo: La manera en la que se van a registrar las lecturas de carga aplicada al pilote teniendo en cuenta los intervalos de tiempo del método que se elija.

De ésta manera el tipo de ensayo de carga lateral variará según las necesidades del proyecto y la disponibilidad de materiales y herramientas que se disponga en obra.

### **2.2. Ensayos de campo realizados**

#### **2.2.1. Ensayo SPT**

Para realizar un diseño por carga lateral a los pilotes, se deben de tener en cuenta los valores de  $N$  y  $N_{60}$  que se obtienen a partir de un ensayo SPT, para así calcular los datos del peso específico y el ángulo de fricción de los estratos del suelo. Dichos valores hacen referencia al número de golpes necesario para que la barra de penetración ingrese 30cm en el suelo.

Por ésta razón se realizó un ensayo SPT que es el ensayo de penetración estándar y consiste en la recuperación de muestras alteradas del suelo, las cuales permiten identificar en campo los tipos de suelo y definir la estratigrafía. Además da como resultado el  $N$ , que es el número de golpes requerido para que el penetrómetro estándar o barra de perforación ingrese 30cm en el suelo. Se puede apreciar un esquema del ensayo SPT en la Figura 2.1.

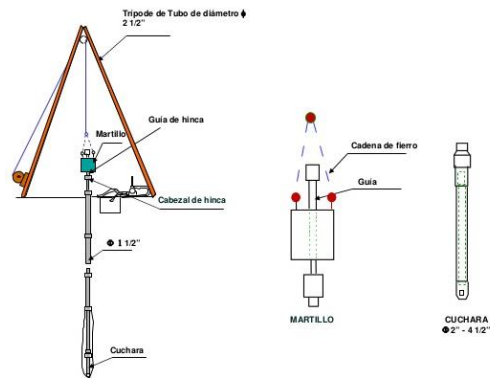


Figura 2.1: Esquema de ensayo SPT (Alva, 2017)

Con los resultados de N se puede observar que a medida que se tienen mayor número de golpes, el estrato muestra mayor resistencia, por lo que esto significa que se está encontrando cada vez un suelo más duro. A partir de un N de 50 se puede considerar el ensayo no da parámetros muy fiables.

### 2.2.2. Ensayo de refracción sísmica

Para complementar los ensayos SPT, es recomendable hacer un ensayo de refracción sísmica, ya que éste determina los parámetros de diseño sismorresistentes, basados en caracterización del perfil de suelos según la velocidad de propagación de onda.

El ensayo de refracción sísmica y MASW (Análisis de Ondas Superficiales en Arreglo Multicanal) consiste en la interpretación de las ondas superficiales (Rayleigh) de un registro en un arreglo multicanal, generadas por una fuente de energía impulsiva en puntos localizados a ciertas distancias determinadas, a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno, obteniéndose el perfil unidimensional de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ), para el punto central de dicha líneas. Su pueden obtener perfiles hasta profundidades promedio de 30m. Se puede apreciar en la Figura 2.2 el esquema del ensayo.

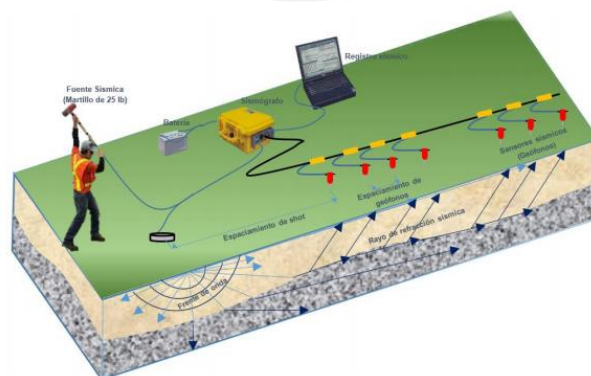


Figura 2.2: Esquema de refracción sísmica (Cahpman, 2004)

Los registros sísmicos son llevados a frecuencias empleando la transformada de Fourier, obteniéndose una curva de dispersión medida, que muestra la velocidad de fase vs la frecuencia. Luego se procede con un proceso iterativo, el cual inicia con un primer ajuste en la curva de dispersión teórica a la curva de dispersión real medida en campo, haciendo uso de la raíz del error medio cuadrático (RMS), como indicador de proximidad entre las curvas teórica y real. Para concluir, el perfil de  $V_s$  del

terreno es construido empleando una transformación, a partir de la curva de dispersión.

Cabe resaltar que la forma de la curva de dispersión está directamente relacionada con la variación de la rigidez con la profundidad, por lo que dicho método tiene la capacidad de identificar estratos más rígidos que yacen sobre otros más blandos.

En la Figura 2.3 se analiza cómo es que primero, al emitirse las ondas, se leen en la computadora mediante un software, que recibe la data del arreglo multicanal, el cual las transforma al dominio de las frecuencias, para luego realizar un ajuste a la curva de dispersión y finalmente invertirla para obtener el perfil de velocidades de ondas de corte.

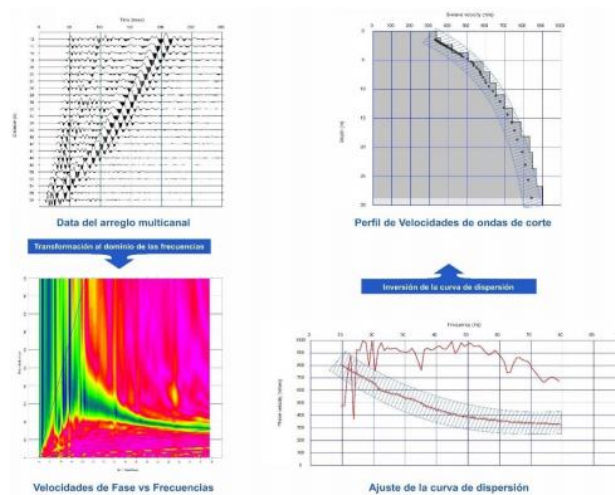


Figura 2.3: Proceso de obtención del perfil de velocidad de ondas de corte (Cahpman, 2004)

## 2.3. Parámetros del suelo

El diseño y análisis de una estructura requiere conocer las propiedades del suelo y del pilote, estas propiedades necesitan ser elegidas con sumo cuidado ya que de estas dependerá la solución que se encuentre a través de los métodos. Es por eso que en este acápite se mostrarán las diferentes correlaciones propuestas por diferentes autores para poder realizar la caracterización del suelo.

### 2.3.1. Velocidad de onda cortante

La velocidad de onda cortante ( $V_s$ ) es la velocidad con la que una onda atraviesa el suelo de manera vertical, como se aprecia en la Figura 2.3. La velocidad de onda cortante no será aplicada en ninguna ecuación directamente, sin embargo, sirve para estimar el peso específico, el módulo de elasticidad, módulo de corte y módulo de Poisson.

Se encontró en la bibliografía diferentes correlaciones sin embargo se escogieron 3, estas correlaciones están en función del valor  $N$  tal como se aprecia en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Fórmulas de Velocidad de Onda Cortante

Autor	Tipo de suelo	Correlación
Dikmen (2009)	Arenas	$V_s = 73 \cdot N^{0.33}$
Ohta y Goto (1978)	Arenas	$V_s = 61.62 \cdot Z^{0.222} \cdot N^{0.254}$
Marto, Choi Soon y Kasim (2013)	Todos los suelos	$V_s = 53.87 \cdot N^{0.407}$

Dónde: N = Numero de golpes obtenidos del SPT, Z = Profundidad del pilote.

El valor de la velocidad de onda cortante se puede encontrar mediante diferentes ensayos; para esta tesis se utilizó el MASW. Compararemos estas correlaciones con el valor obtenido mediante dicho ensayo, en el siguiente capítulo.

### 2.3.2. Angulo de fricción

El ángulo de fricción ( $\phi$ ) es probablemente la propiedad más importante de un suelo granular, cuando se habla acerca de un modelo Mohr Coulomb. El coeficiente de fricción determinará su resistencia y por lo tanto influenciará en el punto de falla del suelo. Se encontró de igual manera que en la onda cortante tal como se aprecia en la Tabla 2.2.

El valor de  $N_1$  hace referencia a la cantidad de golpes necesarios en el ensayo luego de ser corregidos.

Tabla 2.2: Coeficiente de Fricción

Autor	Año	Correlación
Terzagui y Peck	1948	$\phi = 28.5 + 0.25N_{60}$
Peck et al.	1953	$\phi = 26.25(2 - e^{\frac{-N_{60}}{62}})$
Kishida	1969	$\phi = 15 + \sqrt{20N_{60}}$
Schmertmann	1970	$\phi = \tan^{-1} \left[ \left( \frac{N_{60}}{32.5} \right)^{0.34} \right]$
Japan National Railway	1999	$\phi = 27 + 0.30N_{60}$
Japan Road Bureau	1986	$\phi = 15 + \sqrt{9.375N_{60}}$
Hatanaka and Uchida	1996	$\phi = 20 + \sqrt{20N_{60}}$
Montenegro and Gonzalez	2014	$\phi = 12.79 + \sqrt{25.86N_{60}}$

Dónde:  $N_{60}$  = Numero de golpes SPT corregidos.

### 2.3.3. Peso específico

El peso específico ( $\gamma$ ) se estima en función de la onda de corte y la profundidad. Se utilizó el método de Mayne para hallar el peso específico y solo es aplicable cuando no existe nivel freático, el peso unitario del suelo se puede estimar a partir de la velocidad de onda cortante y la profundidad.

La relación es aplicable a los suelos que no están cementados. Al cumplirse estas dos condiciones en nuestro suelo, el método de Mayne podrá ser aplicado sin temor a encontrar mayores errores.

$$\gamma = 8.31 * \log(Vs) - 1.61\log(Z) \quad (2.1)$$

Dónde: Vs = Velocidad de onda cortante y Z = Profundidad del pilote.

### 2.3.4. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad (E) es la relación lineal que existe entre esfuerzo y deformación en el rango elástico. Se encontró de igual manera un resumen que muestra todas estas relaciones que existen entre módulos de elasticidad y el valor de N obtenido en el ensayo de SPT. Esta propiedad será útil para el modelo por elementos finitos y para el método de las curvas  $p$ - $y$ . En la Tabla 2.3 se presentan las correlaciones:

Tabla 2.3: Módulo de Elasticidad (secante y de mediana deformación)

Autor	Año	Ecuación (MPa)
Bowles	1997	$E = 7.355 + 0.78N$
Denver	1982	$E = 7\sqrt{N}$
AASHTO	1996	$E = 0.7N_{160}$
Kuhlawy y Mayne	1990	$E = 0.5N_{60}$

Dónde: N = Numero de golpes obtenidos del SPT corregidos y  $N_{1(60)}$  = Número de golpes corregidos por energía y normalizados por presión de tapada.

### 2.3.5. Coeficiente de poisson

El módulo de poisson ( $\nu$ ) es la relación que existe entre deformación longitudinal y deformación lateral, por lo que representa cuando se deforma lateralmente por unidad de deformación longitudinal. Para el módulo de poisson tenemos la relación propuesta por Jaky (1944).

$$\nu = (1 - \sin(\phi)) / (2 - \sin(\phi)) \quad (2.2)$$

Dónde:  $\phi$  = Ángulo de fricción del suelo.

El módulo de Poisson también será hallado con el ensayo de refracción sísmica, en función de la onda de compresión y la onda de corte.

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad (2.3)$$

Donde:  $V_p$  = Velocidad de onda de compresión,  $V_s$  = Velocidad de onda de corte.

### 2.3.6. Coeficiente de presión lateral

El coeficiente de presión lateral sirve para cuantificar el esfuerzo generado por el suelo de forma horizontal y será útil para desarrollar los métodos analíticos los cuales consideran el coeficiente de presión pasiva como un referente de punto de falla del suelo, es con este valor que encontraremos la carga máxima aplicable.

Para encontrar el coeficiente de presión pasiva del suelo:

$$Kp = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.4)$$

Para encontrar el coeficiente de presión activo del suelo:

$$Ka = \tan^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.5)$$

Dónde:  $\varphi$  = Ángulo de fricción del suelo.

### 2.3.7. Módulo de reacción del suelo

El módulo de reacción del suelo ( $k_h$ ) está descrito como el valor de reacción del suelo frente a una sollicitación horizontal. Éste depende de la geometría del pilote y de los coeficientes de elasticidad y poisson del suelo, así como del pilote. Además varía de acuerdo a la profundidad, lo que significa que para mayores profundidades, el suelo presentará una resistencia superior. La constante de proporcionalidad cuantifica el crecimiento de esta resistencia ( $n_h$ ). En la Tabla 2.4 se pueden observar las distintas fórmulas utilizadas para hallar el módulo de reacción del suelo.

Tabla 2.4: Módulo de reacción del suelo

Método	Año	$k_h$
Matlock y Reese	1956	$k_h = n_h \left(\frac{z}{d}\right)$
Constante	1989	$k_h = \frac{3E_s}{2r}; r = d + 2d \tan \beta$
Lineal	1997	$k_h = k \left(0.308 + 1.584 \frac{d}{l}\right) \left(\frac{z}{rl}\right);$ $r = d + 2d \tan \beta; \beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}$
Vesic	1977	$k_h = (E_s / (1 - \nu^2)) \frac{0.65}{d} \left((E_s d^4) / (E_p I_p)\right)^{\left(\frac{1}{12}\right)}$

Donde:  $k_h$  = Módulo de reacción del suelo,  $n_h$  = Constante de proporcionalidad,  $z$  = Profundidad,  $d$  = Diámetro,  $E_s$  = Módulo de elasticidad del suelo,  $r$  = Reducción del ancho del pilote,  $\beta$  = Angulo de dispersión,  $k$  = Parámetro del suelo según Bowles,  $\nu$  = Módulo de Poisson,  $E_p$  = Módulo de elasticidad del pilote,  $I_p$  = Inercia del pilote.

### 2.3.8. Constante de proporcionalidad

La constante de proporcionalidad ( $n_h$ ) esta descrita como el valor que hace variar en proporción de la profundidad el valor de  $k_h$ , este valor indica que a una mayor profundidad existirá una mayor reacción del suelo y que esta no se mantendrá constante y se puede apreciar en la Tabla 2.5. En la bibliografía se encuentran las siguientes correlaciones, las cuales dependen del valor  $N$  y de  $N_c$  que es un valor corregido de  $N$  debido el esfuerzo efectivo, se muestra la relación a continuación:

$$N_c = N \sqrt{\frac{1}{\sigma'_o}} \quad \text{donde } \sigma'_o \left(\frac{kg}{cm^2}\right) \quad (2.6)$$

Tabla 2.5: Módulo de proporcionalidad del suelo

Autor	Año	Ecuación	Tipo
Terzaghi	1955	$n_h = \frac{\gamma}{1.35} \left( \frac{N}{0.5 + 0.015N} \right)^2 + 80$	-
Décourt	1991	$n_h = N$	Arenas saturadas
Décourt	1991	$n_h = \frac{1.6N}{9.81}$	Arenas secas
Leoni	2000	$n_h = \left[ \frac{Nc}{0.36Nc + 32} \right]^2 + 0.03$	Arenas saturadas
Leoni	2000	$n_h = \left[ \frac{Nc}{0.18Nc + 22} \right]^{1.5} + 0.08$	Arenas secas o húmedas

Dónde:  $N$  = Módulo de reacción del suelo,  $n_h$  = Constante de proporcionalidad,  $Nc$  = Número de golpes normalizado,  $\gamma$  = Densidad del suelo en  $t/m^3$ ,  $\sigma'_o$  = Esfuerzo efectivo.

## 2.4. Cálculo de la resistencia última para pilotes cargados lateralmente

Los métodos de diseño se formularon para poder predecir el comportamiento de ciertos fenómenos, cada uno de estos realiza ciertas asunciones, las cuales le dan las limitaciones al método. Mientras más parámetros reales tengan un método y menos asunciones, mayor será su aproximación a la realidad, en lo siguiente se explicarán los mismos:

### 2.4.1. Métodos estáticos

El método más simple para calcular la carga horizontal última de un pilote, es considerar al pilote como una estructura rígida cuya rotación a la profundidad  $Z_r$  generará dos reacciones. La parte superior del eje de rotación presentará una reacción hacia la izquierda pues el pilote habría presentado un desplazamiento hacia la derecha, mientras que en la parte inferior la reacción y el desplazamiento son inversos. Este sistema de fuerzas debe cumplir los principios de la estática, entonces se formulan las ecuaciones de equilibrio las cuales dependerán de la función de reacción conocida como  $p_u$ , como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$H_u = \int_0^{Z_r} p_u B dz - \int_{Z_r}^L p_u B dz \quad (2.7)$$

$$M_u = H_u e = - \int_0^{Z_r} p_u B z dz + \int_{Z_r}^L p_u B z dz \quad (2.8)$$

Estas ecuaciones pueden ser mejor comprendidas en el siguiente diagrama de cuerpo libre, que se presenta en la Figura 2.4.



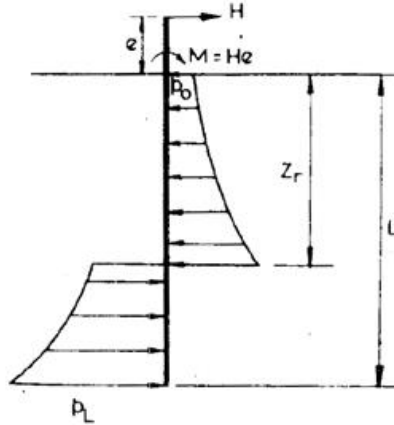


Figura 2.4: Diagrama de cuerpo libre pilote rígido (Poulos, 1980)

Las funciones de reacción encontradas en la bibliografía fueron las que se observan en la Figura 2.5 y las fórmulas utilizadas se presentan en la Tabla 2.6.

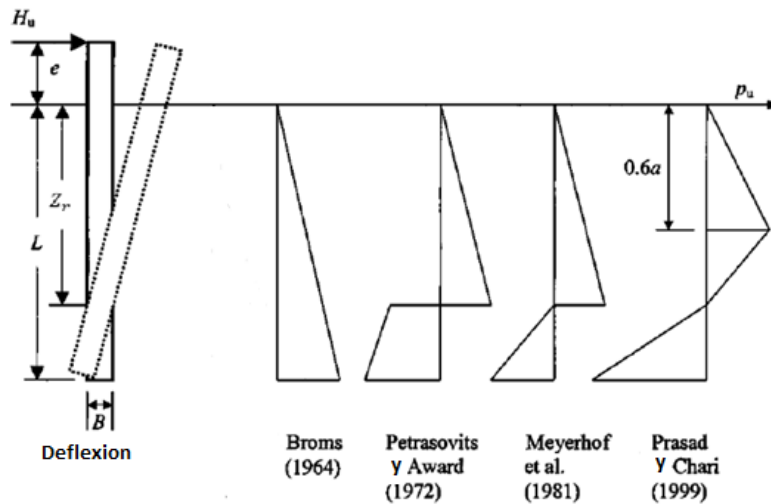


Figura 2.5: Funciones de reacción (Zhang, 2005)

Tabla 2.6: Función de reacción

Método	Función de reacción ( $p_u$ )	Observaciones
Broms (1964)	$p_u = 3K_p\gamma z$	No considera el cambio de dirección en la reacción. Ecuación para pilotes flexibles.
Petrasovits y Award (1972)	$p_u = (3.7K_p - K_a)\gamma z$	Método iterativo
Meyerhof et al. (1981)	$p_u = (K_p - K_a)\gamma z S_{bu}$	Posee respuesta para pilotes flexibles
Prasad y Chari (1999)	$p_u = 10^{(1.3 \tan\phi + 0.3)}\gamma z$	En el artículo se puede aplicar $0.8p_u$

Dónde:  $p_u$  = Reacción del suelo,  $K_p$  = Coeficiente pasivo del suelo,  $\gamma$  = Densidad del suelo,  $z$  = Profundidad,  $K_a$  = Coeficiente activo del suelo,  $\phi$  = Ángulo de fricción,  $S_{bu}$  = Factor de forma.

El comportamiento rígido del pilote no solo depende del material y su sección, sino también del suelo. Si el suelo presenta una baja resistencia un pilote podrá comportarse de forma rígida aun teniendo relaciones de longitud entre diámetro altas, de igual manera un suelo muy resistente puede hacer que un pilote se comporte flexiblemente.

En la Tabla 2.7 se presentan las respuestas de los cuatro métodos, donde  $H_u$  representa la carga

última. Aplicando las ecuaciones, considerando las cuatro reacciones, se obtienen los valores de carga última y momentos máximos.

Tabla 2.7: Solución del pilote de comportamiento rígido ( $H_u$ )

Método	Solución pilote de comportamiento rígido
Broms (1964)	$H_u = \frac{0.5\gamma BL^3 K_p}{e+L}; M_{max} = H_u(e + \frac{2}{3}Z_r);$ $Z_r = 0.82 \sqrt{\frac{H_u}{B\gamma K_p}}$ $a = (3.7K_p - K_a)\gamma B$
Petrasovits y Award (1972)	$Z_r = \sqrt{\frac{H_u}{a} + \frac{L^2}{2}} = \sqrt[3]{-1.5(\frac{H_u e}{a} - \frac{L^3}{3})}$
Meyerhof et al. (1981)	$H_u = 0.12\gamma BL^2 K_p$
Prasad y Chari (1999)	$Z_r = \frac{[-(0.567L+2.7e)+(5.307L^2+7.29e^2+10.54eL)^{0.5}]}{2.1996}$ $H_u = 0.24[10^{(1.3\tan\phi+0.3)}]\gamma Z_r B\{2.7Z_r - 1.7L\}$

Dos de estos métodos presentan soluciones para pilotes de comportamiento flexible, estas respuestas consideran que el tipo de falla no es rígida. Estas soluciones se muestran a continuación en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8: Solución pilote de comportamiento flexible

Método	Solución pilote de comportamiento flexible
Broms (1964)	$M_{max} = M_y = H_u(e + \frac{2}{3}Z_r)$ $H_u = 1.5\gamma BK_p Z_r^2$
Meyerhof et al. (1981)	$H_u = 0.12\gamma BL_e^2 K_p$ $L_e = L1.65K_{rs}^{0.12}(1); K_{rs} = \frac{E_p I_p}{E_h L^4}$

El método funciona si se considera que solo existe un estrato de suelo, por lo que mientras más heterogéneo sea el suelo mayor será la fuente de error.

Debido a la naturaleza heterogénea del suelo es muy difícil que un suelo reaccione tal como lo predicen los métodos, además esto se puede observar en un resumen de ensayos y predicciones realizado por Prasad y Chari (1999), donde se puede observar que estos mismos métodos presentan sobreestimaciones o desestimaciones de hasta un más menos 80%, motivo por el cual su uso debe considerar factores de seguridad elevados lo que con lleva un sobredimensionamiento en la estructura.

Una de las principales problemáticas del método es que no puede calcular los esfuerzos a diferentes profundidades porque se asumió que el suelo ya había fallado, en teoría el esfuerzo en el que se encuentran es el esfuerzo de falla, otra desventaja es que no se puede calcular los esfuerzos que genera una fuerza menor a la de falla. Sin embargo, podemos calcular un factor de seguridad entendiendo este como la división entre la fuerza de falla y la fuerza aplicada.

#### 2.4.2. Uso de curvas $p$ - $y$

El método  $p$ - $y$  es un método que relaciona la reacción del suelo, el módulo de elasticidad del

suelo y su desplazamiento. El módulo de elasticidad varía en función de la profundidad, este factor de variación es conocido como  $k_n$ . Debido a la existencia del módulo de reacción  $k_n$  el suelo presentará diferentes módulos de elasticidad a diferentes profundidades.

Si se analizan las fuerzas que actúan en un elemento diferencial como se muestra en la Figura 2.6 y realizamos un equilibrio de momentos en el punto  $x$ , y podemos observar que:

$$dM + P_x dy - V_v dx = 0 \quad (2.9)$$

Se deriva dos veces en función de  $x$ .

$$\frac{d^2 M}{dx^2} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{dV_v}{dx} = 0 \quad (2.10)$$

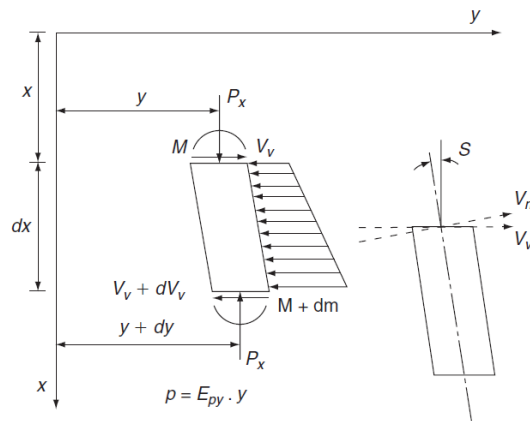


Figura 2.6: DCL (Zhang, 2005)

Se tiene además las siguientes igualdades que se pueden apreciar en la Figura 2.7.

$$S = \frac{dy}{dx} \quad M = \frac{d^2 y}{dx^2} EI \quad V = \frac{d^3 y}{dx^3} EI \quad p = \frac{d^4 y}{dx^4} EI \quad (2.11)$$

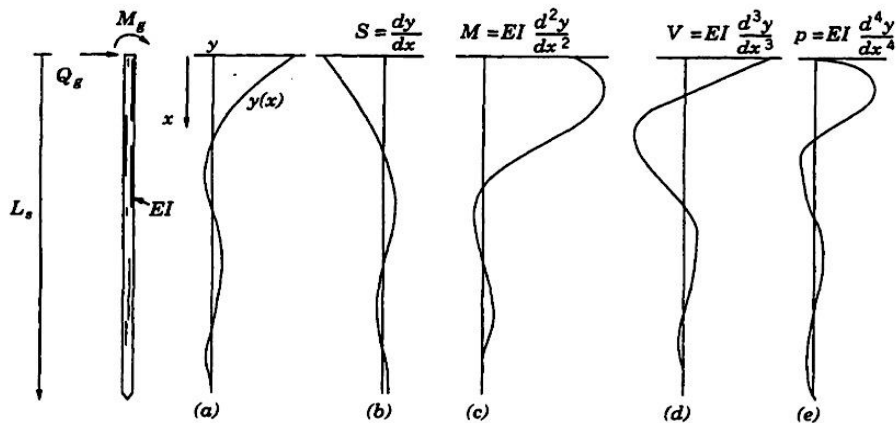


Figura 2.7: Un pilote de longitud  $L_e$  totalmente incrustado en el suelo y actuado por cargas  $Q$  y  $M$ ; (a) Deflexión; (b) Giro,  $dy/dx$ ; (c) Momento,  $EI(d^2y/dx^2)$ ; (d) Corte,  $EI(d^3y/dx^3)$ ; (e) Reacción del suelo  $EI(d^4y/dx^4)$  (Reese and Matlock, 1956)

Dónde:  $\frac{dy}{dx}$  = diferencial de desplazamiento lateral sobre diferencial de profundidad,  $E$  = Módulo de Elasticidad del pilote y depende del material,  $I$  = Momento de Inercia de la sección del pilote,  $L_e$  = Longitud.

Una igualdad que se debe cumplir es que la reacción del suelo es igual al módulo de elasticidad

multiplicado por su desplazamiento.

$$p = E_s y \quad (2.12)$$

Dónde:  $p$  = reacción del suelo por metro de fondo (MN/m),  $E_s$  = Módulo de Elasticidad del suelo (MPa),  $y$  = Desplazamiento horizontal (m).

Una igualdad igual de importante que se debe cumplir es la relación que tiene el módulo de elasticidad con la profundidad.

$$k_h x = E_s \quad (2.13)$$

Dónde:  $k_h$  = Módulo de reacción del suelo,  $E_s$  = Módulo de Elasticidad del suelo,  $x$  = Profundidad.

Luego de reemplazar estas ecuaciones tendremos la ecuación que describirá el comportamiento de nuestro pilote.

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} + E_s y = 0 \quad (2.14)$$

La ecuación que describe nuestro modelo es una ecuación cuyo resultado exacto es muy difícil de encontrar, por lo que normalmente se aplican métodos aproximados para poder resolver el sistema. El método que se aplica usualmente es el de diferencias finitas, que utiliza la definición del límite para poder encontrar la derivada en un punto exacto. La cuarta derivada en un punto  $i$  se puede aproximar como:

$$\frac{d^4 y}{dx^4} = \frac{f_{i+2} - 4f_{i+1} + 6f_i - 4f_{i-1} + 6f_{i-2}}{h^4} \quad (2.15)$$

La segunda derivada en un punto  $i$  se puede aproximar como:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{f_{i+1} - 2f_i + 2f_{i-1}}{h^2} \quad (2.16)$$

Reemplazando se tiene:

$$E_p I_p (f_{i+2} - 4f_{i+1} + 6f_i - 4f_{i-1} + 6f_{i-2}) + P_x h^2 (f_{i+1} - 2f_i + 2f_{i-1}) + E_s h^4 f_i = 0 \quad (2.17)$$

Recordar que  $f(x)$  es la función desplazamiento en relación con la profundidad. Si dividimos el pilote en  $n$  partes, cada uno de una longitud  $h$ , tendremos  $n+1$  puntos por lo que tendremos  $n+1$  ecuaciones como se muestra en la imagen  $x$ , sin embargo, al ser una ecuación de cuarto grado tendremos  $n+5$  incógnitas. Las cuatro ecuaciones que faltan serán las condiciones de contorno. Dos de estas ecuaciones las podemos deducir de la base.

Los momentos en la base son cero, entonces tenemos la siguiente ecuación:

$$f_{b-1} - 2f_b + f_{b+1} = 0 ; E_p I_p \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right) = 0 \text{ en } x = L \quad (2.18)$$

La cortante en la base es cero, entonces se tiene:

$$\frac{E_p I_p}{2h^3} (f_{b-2} - 2f_{b-1} + 2f_{b+1} - f_{b+2}) + \frac{P_x}{2h} (f_{b-1} - 2f_{b+1}) = 0 \quad (2.19)$$

$$E_p I_p \left( \frac{d^3 y}{dx^3} \right) + P_x \left( \frac{dy}{dx} \right) = 0 \text{ en } x = L \quad (2.20)$$

Las otras dos ecuaciones dependen de las condiciones de contorno en la parte superior, en el caso de un pilote de cabeza libre tenemos dos ecuaciones.

La primera es que la cortante en la cabeza es igual a la cortante aplicada:

$$\frac{E_p I_p}{2h^3} (f_{t-2} - 2f_{t-1} + 2f_{t+1} - f_{t+2}) + \frac{P_x}{2h} (f_{t-1} - 2f_{t+1}) = 0 \quad (2.21)$$

La segunda es que el momento en la cabeza es igual al momento aplicado en la cabeza:

$$\frac{R_t}{h^2} (f_{t-1} - 2f_t + f_{t+1}) = M_t \quad (2.22)$$

Con estas cuatro ecuaciones adicionales podremos resolver el sistema de una manera matricial como se observa en la Figura 2.8.

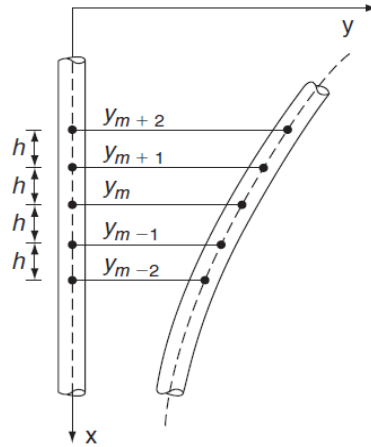


Figura 2.8: Deformación del pilote (Reese and Matlock, 1956)

### 2.4.3. Antecedentes del método de los elementos finitos

Khodair y Abdel-Mohti (2014) realizaron un análisis numérico de la interacción pilote – suelo bajo cargas axiales y laterales, este artículo compara la respuesta de momentos que se encuentran en el LPILE (2012) y ABAQUS.

Lo primero que se realiza es una asignación de propiedades de los materiales tanto del suelo como del pilote. Se muestra como ejemplo el que se desarrolló en el artículo, el tipo de suelo que utilizó se puede observar en la Figura 2.9. La sección de concreto con un armado tipo “W”, se muestra en la Figura 2.10.

Estrato 1, Profundidad 0.00 a 3.35. Arcilla Dura libre de agua.	$\gamma = 2001.2 \text{ kg/m}^3$ , $c=47.85 \text{ kPa}$ , $\epsilon_{50}= 0.009$
Estrato 2, Profundidad 3.35 a 20.12 m. Arcilla Dura libre de agua.	$\gamma = 1001.2 \text{ kg/m}^3$ , $c=47.85 \text{ kPa}$ , $\epsilon_{50}= 0.009$
Estrato 3, Profundidad 20.12 a 26.82 m. Roca debil.	$\gamma = 2159.3 \text{ kg/m}^3$ , $q_u=5.17 \text{ MPa}$ , $E_r= 3.45 \text{ GPa}$ , $RQD= 50\%$

Figura 2.9: Estratos del suelo caracterizados (Khodair y Abdel, 2014).

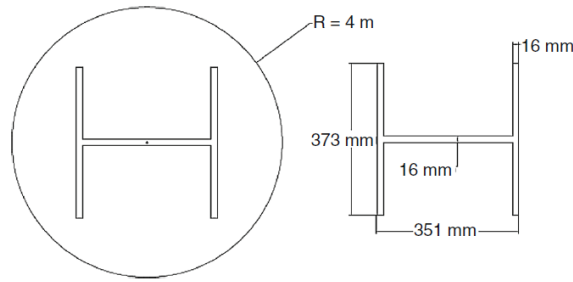


Figura 2.10: Sección de pilote (Khodair y Abdel, 2014)

Luego de definir los materiales y los elementos, la interacción entre suelo-concreto, el estado inicial de esfuerzos, la malla y las condiciones de contorno, a este elemento se le impuso un desplazamiento de 2 cm en la cabeza del pilote en vez de someterlo a una carga con lo que se obtuvo el gráfico de momento flector vs profundidad, el cual se comparó con la respuesta del LPILE, tal como se puede observar en la Figura 2.11. Lo último que se acota en el artículo es un análisis paramétrico que le permite conocer la influencia de parámetros como: el esfuerzo axial, el módulo de elasticidad y el diámetro del suelo que rodea el pilote.

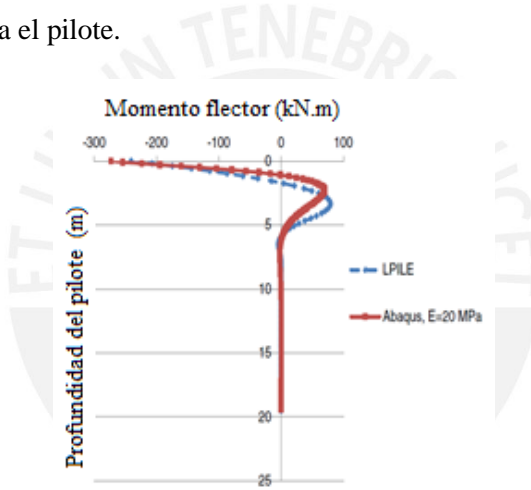


Figura 2.11 Momento flector vs Profundidad (Khodair y Abdel, 2014)

## 2.5. Prueba de carga lateral en pilotes

Existen varias maneras de realizar la prueba de carga lateral según la norma ASTM 3966-07 (2013) y se distinguen según como se aplica la carga lateral. Los métodos de prueba permiten los procedimientos de ensayo observados en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9: Procedimientos de ensayos para pilotes cargados lateralmente (ASTM 3966, 2013)

Método	Solución pilote de comportamiento flexible	Ecuación
A	Carga Estándar	8.1.2
B	Carga de sobrecarga	8.1.3
C	Carga cíclica	8.1.4
D	Carga	8.1.5
E	Carga inversa	8.1.6
F	Carga recíproca	8.1.7
G	Movimiento lateral especificado	8.1.8
H	Carga combinada	8.1.9

El método de la aplicación de carga estándar es obligatorio según la ASTM y los demás son opcionales, gracias a la simplicidad del ensayo de carga estándar, puesto que los demás métodos varían según cómo se aplica la carga y cuáles instrumentos se utilizarán. Por ende varía el método de análisis para la determinación de la carga lateral última, por lo que mucho depende de lo que la empresa encargada de realizar el ensayo predisponga para ejecutarlo y procesarlo, ya que dependiendo de los materiales en obra, va a variar la manera de construir el mecanismo de reacción, siempre teniendo en cuenta de que mientras más rígido sea, el ensayo será más preciso.

El ensayo a realizar será siguiendo el método estándar, el cual se basa en cargar el pilote progresivamente en 10 tiempos hasta un 200% de su carga admisible, para luego descargarlo en 4 tiempos, por lo que en total el ensayo dura aproximadamente 4 horas, ya que cada carga se aplica en un intervalo entre 5, 10 y 20 minutos para la carga y la descarga.

La instrumentación del ensayo consiste en: Mecanismo de reacción, gato hidráulico, pistón, planchas metálicas (de 2" como mínimo), deformímetros y manómetros. La instalación de dichos instrumentos depende de la disponibilidad y de la cantidad de pilotes a ensayar tal como se observa en la Figura 2.12.

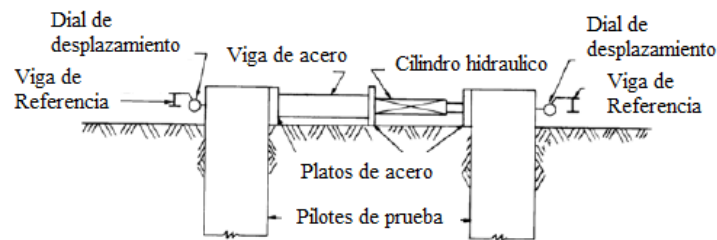


Figura 2.12: Arreglo típico para ensayar dos pilotes simultáneamente (viga/peso muerto, pilote, pistón, cilindro hidráulico, pilote y viga/peso muerto)

La prueba de carga lateral consiste en la instalación de un mecanismo de reacción que haga el papel de un muro lo suficientemente pesado y rígido para que no genere ningún movimiento de traslación ni rotación, es decir que dicho mecanismo debe permanecer estático y no presentar ninguna deformación, para así no distorsionar los valores de deformación que se tomen a la hora de realizar el ensayo. A continuación, se detallan algunos mecanismos de reacción según la norma, en la Figura 2.13, basados en pilotes con bloques de concreto, pesos muertos o plataformas muy pesadas.

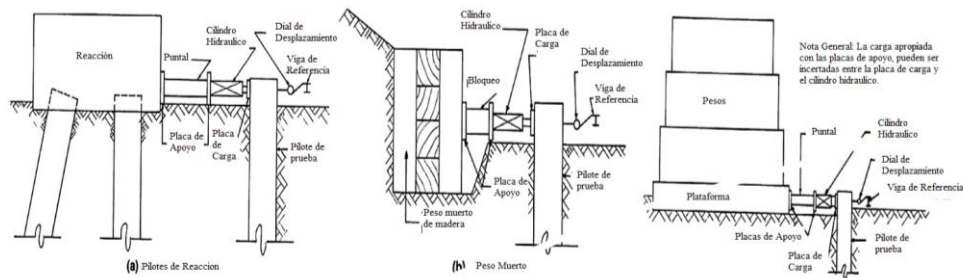


Figura 2.13: Mecanismos de Reacción (ASTM, 2013)

Dicho mecanismo de reacción va conectado a un pistón que luego va conectado hacia un gato hidráulico el cual le dará las cargas laterales al pilote. Es necesario el uso de planchas de acero para



evitar cualquier tipo de deformación entre los extremos de los instrumentos (pistón – mecanismo de reacción, pistón – gato hidráulico, gato hidráulico – pilote).

Finalmente se utiliza cualquier instrumento de medición de desplazamientos y presiones como deformímetros y manómetros. En la Figura 2.14 se puede apreciar un deformímetro digital, que son los más utilizados gracias a su precisión y un manómetro, que se utilizan en los gatos hidráulicos para medir la presión/fuerza que se le está dando al elemento en estudio.

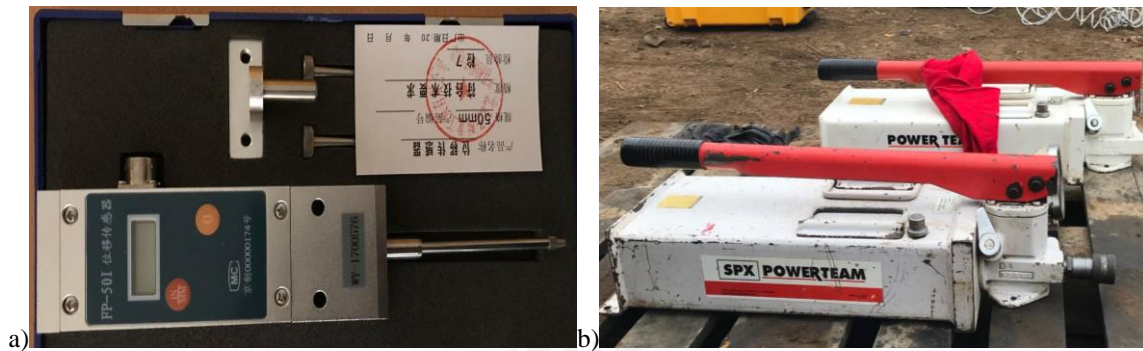


Figura 2.14: (a) Deformímetro digital y (b) Manómetro: Mecanismos de medición de presiones

Una vez obtenidas las mediciones de carga vs desplazamiento, con el manómetro y al deformímetro, se dibuja la curva de carga y descarga, la cual va a determinar las cargas últimas y cargas admisibles del pilote. Si el pilote falla antes de la carga última teórica, se propone descargar el pilote, ya que, con materiales como el acero, luego sería difícil que el pilote retorne a su estado natural, por lo que se distorsionarían un poco las curvas en la descarga. En la Figura 2.15, se presenta el resultado esperado de la curva de carga y descarga del ensayo de carga lateral.

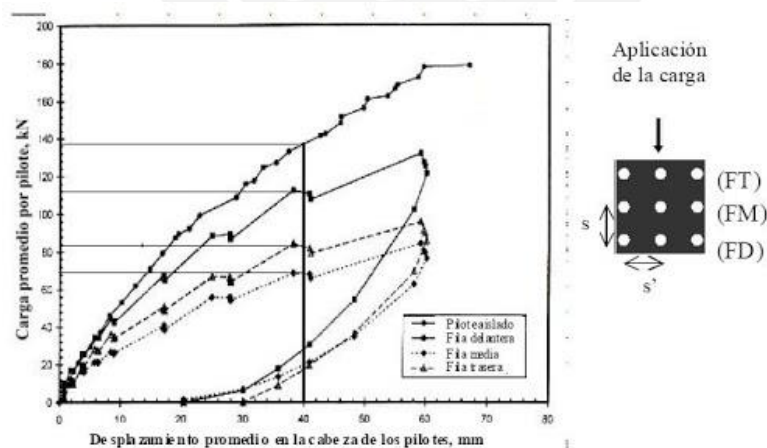


Figura 2.15: Prueba de carga lateral en un grupo de pilotes hincados en arcilla y limo blando y esquema de grupo de pilotes con fila delantera, media y trasera (Rollins et al., 1998)

La curva en mención hace referencia a que el material a ensayar se encontrará en el rango elástico hasta llegar a su carga última, luego de ésta, el pilote no regresará a su estado natural, sino que fallará y quedará deformado, por lo que es muy importante prestar atención en cuanto se estén aplicando las cargas, ya que si observa una deformación muy grande, es preferible terminar la carga en ese instante para que así el pilote pueda regresar a su estado natural y evitar las deformaciones permanentes en el mismo.



La curva de carga y descarga da a entender cuánto es lo que realmente soporta el pilote frente a cargas horizontales, teniendo en cuenta sus desplazamientos, para que así el pilote se cargue hasta tener las deformaciones máximas permitidas por la norma.



### 3. Caracterización geotécnica

La caracterización es el proceso en el cual se describe y analiza las propiedades mecánicas del suelo, para poder explicar su comportamiento frente a diferentes sollicitaciones. El proyecto de investigación fue en Chilca, ubicado en el km 69 de la Panamericana Sur, donde la empresa PSV realiza los estudios para los ensayos de pilotes; aquí se encuentra el almacén central donde se albergan los equipos de la empresa y es por esa facilidad que se eligió dicha localidad, ya que el proyecto fue con fines netamente académicos y no constructivos.

Se realizaron ensayos SPT, de refracción sísmica y de laboratorio (contenido de humedad, peso específico relativo de los sólidos, límites de Atterberg y granulometría por tamizado), obteniendo así una compatibilización del perfil del suelo arenoso. Se realizaron los ensayos para saber su peso específico como propiedad general, las propiedades mecánicas tanto en el orden plástico como en el elástico; en éste último asumimos linealidad, con un módulo de elasticidad constante ( $E$ ), sin embargo para poder compensar las falencias de esta asunción utilizaremos el módulo de elasticidad secante. Como modelo constitutivo, se usa el modelo Mohr Coulomb, que utiliza el coeficiente de fricción como parámetros principal. Además de los parámetros mencionados utilizaremos otros como la velocidad de onda de corte, el coeficiente de reacción entre otros.

#### 3.1. Ubicación

La ubicación donde se desarrollaron los ensayos es “Los Huertos de Oro de San Hilarión, distrito de Chilca, Provincia de Cañete, Lima, Perú”. En la Figura 3.1, se presenta la ubicación de Chilca respecto a Lima, donde se ubica el almacén central de PSV. Aquí se realizó el ensayo de carga lateral.

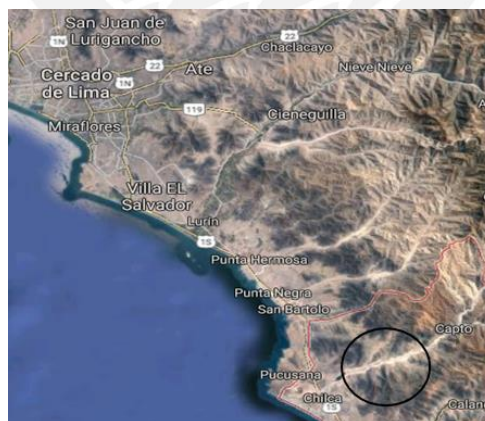


Figura 3.1: Ubicación del Almacén PSV Chilca en el mapa

#### 3.2. Geología

Según la publicación de INGEMMET (Salazar et al., 2002), Chilca está situada encima de depósitos aluviales (Qh-a11) que se formaron en la era cenozoica cuaternaria (serie holocena).

Los depósitos aluviales son producto del transporte y depósito de detritos por medio de la acción del agua. Los elementos que los conforman comprenden arcillas, arenas, gránulos, guijarros, cantos y bloques de formas muy variables desde angulosas a redondeadas. Por lo que ocupan cauces, llanuras y





Figura 3.3: Ensayo SPT en Chilca

La ejecución del ensayo arroja los valores de N, el número de golpes necesarios para penetrar 3 intervalos de 15 cm se cuenta, la suma del segundo y tercer intervalo da el valor de N. Los valores de N debido a la cantidad de variaciones que pueden existir necesitan ser corregidos.

El  $N_{1,60}$  es considerar el N corregido por todos los factores externos y adicionalmente corregido por energía.

El SPT permite obtener muestras alteradas con lo que podemos obtener el perfil estratigráfico el cual está constituido íntegramente por arenas ligeramente limosas, con ligero contenido de grava fina y con sectores que contienen partículas aisladas de grava de tamaño medio.

El valor de  $N1(60)$  en el primer estrato se calcula omitiendo el primer valor de N puesto que este es un valor no representativo.

Tabla 3.1: Resultados SPT

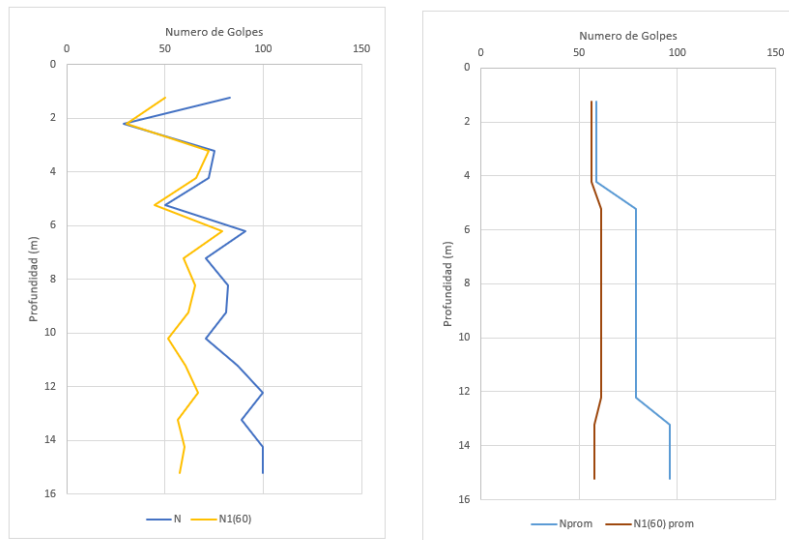
<b>Profundidad</b>	<b>N</b>	<b>N1(60)</b>	<b>N1 (60) por estrato</b>
1 – 1.45	83	98.62	56.11
2 – 2.45	29	30.29	56.11
3 – 3.45	75	72.31	56.11
4 – 4.45	72	65.73	56.11
5 – 5.45	50	44.92	61.19
6 – 6.45	91	79.10	61.19
7 – 7.45	71	59.40	61.19
8 – 8.45	82	65.51	61.19
9 – 9.45	81	61.69	61.19
10 – 10.45	71	51.64	61.19
11 – 11.45	87	60.62	61.19
12 – 12.45	100	66.60	61.19
13 – 13.45	89	56.68	57.99
14 – 14.45	100	59.88	57.99
15 – 15.45	100	57.41	57.99

Al analizar la Tabla 3.1 se consideran tres estratos: El primero que consta desde la superficie

hasta los 5m, el segundo estrato desde 5m de profundidad hasta 13m y el tercero de 13m hasta 16m. El ensayo MASW sirvió como referencia (Tabla 3.2) para la estratificación puesto que los resultados del mismo separaron al suelo en tres estratos debido a las diferentes velocidades de onda cortante existente, el cual se puede observar en la Figura 3.4.

Tabla 3.2: Propiedades de estratos idealizados obtenidas de los resultados del MASW

Suelo	Prof. (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (Poisson)	G <sub>máx</sub> (t/m <sup>2</sup> )	E <sub>máx</sub> (t/m <sup>2</sup> )	E=0.1*E <sub>máx</sub>
Suelo medianamente denso	0.0 - 5.0	200	415	1.75	0.35	7135.58	19248.11	1924.81
Suelo medianamente denso	5.0 - 13.0	270	560	1.75	0.35	13004.59	35075.11	3507.51
Suelo denso	13.0 - 20.0	395	800	1.80	0.34	28628.44	76656.02	7665.60



a) Resultados SPT corregidos b) Promedios por estrato

Figura 3.4: Resultados del ensayo SPT corregidos y promedios por estrato

### 3.4.2. Ensayos de laboratorio

Se utilizaron los siguientes ensayos:

- Contenido de humedad (ASTM D2216)
- Peso específico relativo de los sólidos (ASTM D854)
- Límites de Atterberg (ASTM 4318)
- Ensayo de Granulometría

Los resultados de estos ensayos fueron realizados, pero no sustentados y se muestran en la Tabla 3.3 a continuación.

Tabla 3.3: Resultados de laboratorio de suelos

Muestra	Profundidad (m)	SUCS	Gs	Humedad (%)
P1	1 – 1.45	SM	2.69	3.8
P1	2 – 2.45	SP – SM	2.69	7.4
P1	3 – 3.45	SM	2.69	11.7
P1	4 – 4.45	SM	2.67	14.1
P1	5 – 5.45	SM	2.69	17.2
P1	6 – 6.45	SP – SM	2.68	14.3
P1	7 – 7.45	CL - ML	2.69	32.2
P1	8 – 8.45	SM	2.66	13.2
P1	9 – 9.45	SP	2.67	15.3
P1	10 – 10.45	SP – SM	2.73	19
P1	11 – 11.45	SP – SM	2.71	20.5
P1	12 – 12.45	SM	2.69	13.8
P1	13 – 13.45	SP – SM	2.72	24.0
P1	14 – 14.45	SP – SM	2.70	22.3
P1	15 – 15.45	SP – SM	2.73	18.1

Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 3.2, se compatibilizaron los estratos que demostraban condiciones similares entre sí, dando 3 estratos de 5.0 m, 8.0 m y 3.0 m, el cual se muestra a continuación en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4: Promedios de: granulometría, propiedades gravimétricas y volumétricas por estratos

Estrato	Gs	Humedad (%)
Estrato 1 (0.00 – 5.00)	2.685	9.25
Estrato 2 (5.00 – 13.00)	2.69	18.19
Estrato 3 (13.00 – 16.00)	2.716	21.47

### 3.4.3. Ensayo de refracción sísmica

El ensayo de refracción sísmica (ASTM D5777-00) se basa en la medición de los tiempos de viaje de las ondas compresionales tipo P generadas por un golpe de impacto producido con una comba de 20 lb; los impactos se localizan a diferentes distancias a lo largo de un eje sobre la superficie del suelo. La energía fue detectada y registrada de tal manera que puede determinarse el tiempo de arribo en cada punto (SENCICO, 2016).

Para realizar los ensayos de refracción sísmica y MASW primeramente se define el eje de la línea sísmica, luego se procede a instalar los geófonos y los cables de conexión al equipo de adquisición de datos. El espaciamiento entre geófonos es definido en función de la profundidad de exploración requerida y del área libre disponible en la zona de trabajo, ver la Figura 3.5. El equipo utilizado cuenta con 24 canales y una longitud de cable máxima de 120 m (ZER, 2018).



Figura 3.5: Vista general del tendido del cable refracción y posicionamiento de geófonos

En el ensayo de refracción sísmica y MASW la fuente de energía utilizada para generar ondas sísmicas consistió en el golpe de un martillo de 20 lb sobre un plato metálico, ver la Figura 3.6.



Figura 3.6: Generación de la energía sísmica para el ensayo MASW

De acuerdo a los datos de ubicación del pilote a ensayar lateralmente, se establecieron las ubicaciones que fueron distribuidas según el emplazamiento de las estructuras proyectadas y las políticas de seguridad. Asimismo, los perfiles sísmicos de los ensayos de refracción sísmica y MASW se encuentran en la figura 3.8 y 3.9, mientras que el informe se aprecia en el Anexo 2 Ensayo de refracción sísmica y Anexo 3 Modelo Unidimensional de Ondas de Corte MASW.

Con los registros de las ondas sísmicas obtenidas en la línea de exploración sísmica realizada se determinó las curvas tiempo-distancia o dromocrónicas. Con esta información se realizó la interpretación del perfil sísmico de velocidades de ondas P ( $V_p$ ) que se presentan en el Anexo 2.

En el Anexo 3 muestra la curva de dispersión y el modelo unidimensional de ondas de corte de los sondajes MASW. Para la clasificación en el perfil de suelo, las velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) fueron comparadas con los rangos indicados en la norma E.030 “Diseño Sismorresistente”. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30.0 m (ZER, 2018).

a) Perfil Sísmico LS-01 (Figura 3.7)

Se complementó el perfil con el sondaje MASW-01, el cual se realizó en el centro de la línea LS-01. Dicho perfil tiene 60.0 m de longitud. La interpretación de estos ensayos genera el perfil sísmico A-A, el cual muestra la presencia de dos estratos sísmicos.



El primer estrato presenta valores de velocidad de ondas P ( $V_p$ ) entre 200 m/s y 600 m/s, con un espesor variables de 13.0 m a 14.5 m. Estratigráficamente está conformado por un suelo medianamente denso.

El segundo estrato presenta velocidades de propagación de ondas P ( $V_p$ ) entre 600 m/s y 800 m/s con un espesor variable de 7.0 m a 8.5 m. Estos valores de velocidad se incrementan con la profundidad. El estrato está conformado por un suelo denso (ZER, 2018).

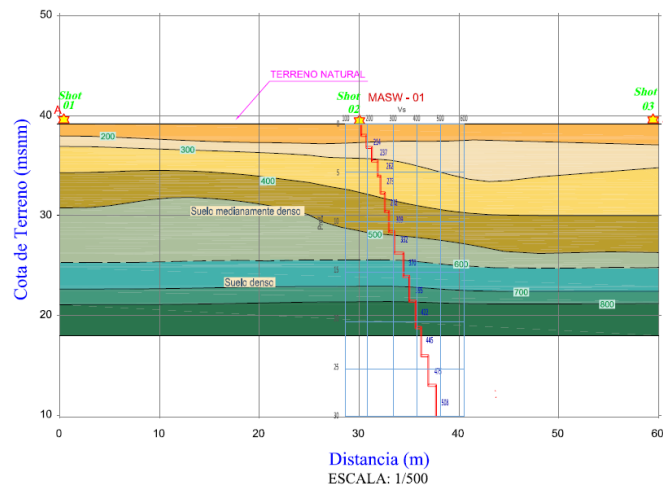


Figura 3.7: Perfil sísmico línea LS-01

b) Sondaje MASW-01 (Figura 3.8)

Tiene 66.0 m de longitud. En el cual se distinguió la presencia de dos estratos con propiedades elásticas diferentes.

El primer estrato presenta valores de velocidad de onda S ( $V_s$ ) entre 190 m/s y 330 m/s, con un espesor de 13.0 m. Estratigráficamente está conformado por un suelo medianamente denso.

El segundo estrato presenta valores de velocidad de onda S ( $V_s$ ) entre 370 m/s y 510 m/s, con un espesor de 17.0 m. Estratigráficamente está conformado por un suelo denso.

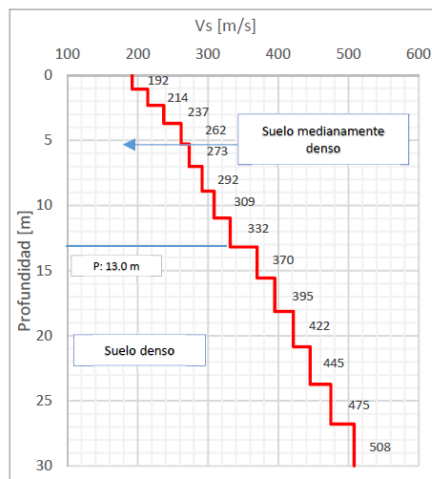


Figura 3.8: Velocidad de onda de corte vs Profundidad MASw



### 3.5. Parámetros geotécnicos

Los parámetros geotécnicos son muy variados. Dependiendo del autor podemos encontrar diversas correlaciones. El MASW encontró el valor de la velocidad de onda cortante. Los valores de peso específico y módulo de elasticidad fueron calculados utilizando correlaciones basadas en dicha velocidad. En la Figura 3.9 se presentan los resultados de la velocidad de onda cortante y peso específico mediante correlaciones con el SPT y su comparación con las encontradas mediante el ensayo.

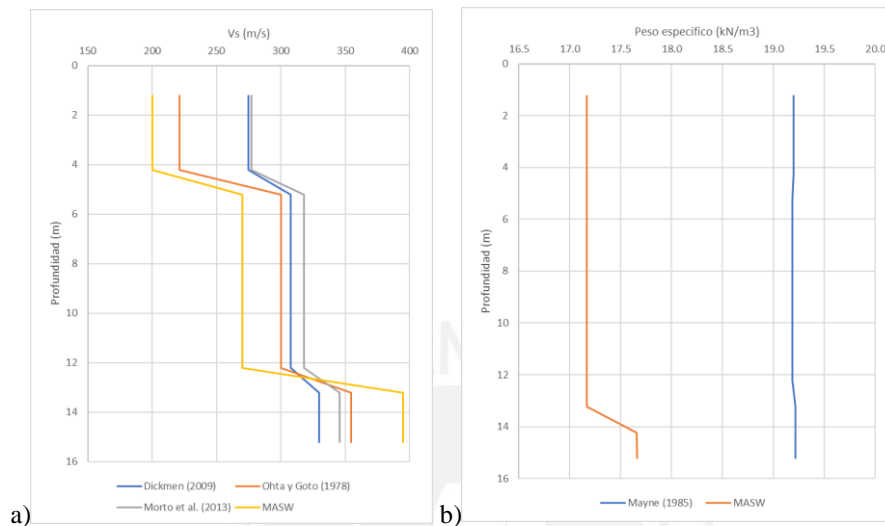


Figura 3.9: a) Peso específico vs profundidad; b) Velocidad de onda cortante vs profundidad (Mayne y MASw)

En la Figura 3.10 se presenta los resultados de profundidad vs  $\phi$ , como se puede apreciar los valores del ángulo de fricción son elevados debido a que los mismos valores del SPT resultaron altos. En el análisis realizado se utilizó la ecuación de Peck, la cual representa uno de los valores más bajos encontrados; sin embargo, en el capítulo 7 (Análisis Paramétrico), se comparará la respuesta con valores 20% más elevados y 20% más bajos. Cabe resaltar que los valores del ángulo de fricción son elevados debido a la propia naturaleza del terreno en el cual se hizo el ensayo, un terreno que esta compactado por el paso habitual de maquinaria pesada.

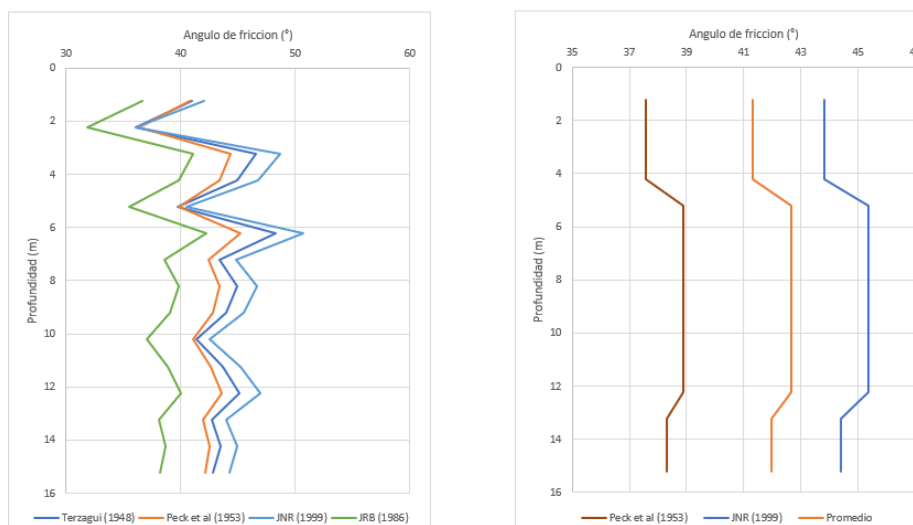


Figura 3.10: Ángulo de fricción en función de la profundidad

El ángulo de fricción también sirve para hallar el módulo de poisson según Jaky (1944). El módulo de poisson que se utiliza es el promedio entre Jaky y el resultado del MASW (Figura 3.11).

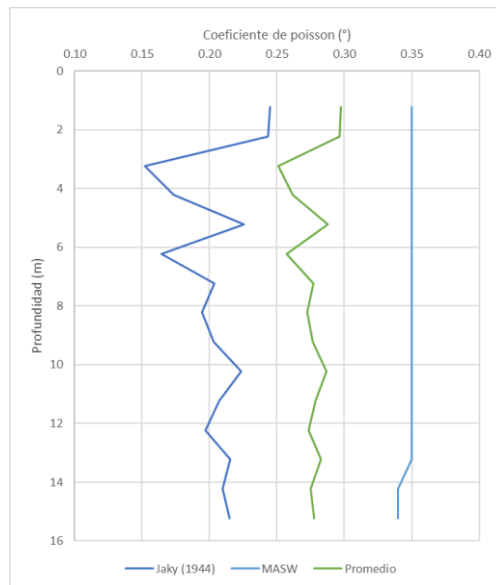


Figura 3.11: Módulo de Poisson en función de la profundidad

Los valores que se utilizan para el módulo de elasticidad son los que se calculan mediante correlaciones basadas en la velocidad de onda cortante encontrados en el MASW. Estos valores se muestran en la Figura 3.12.

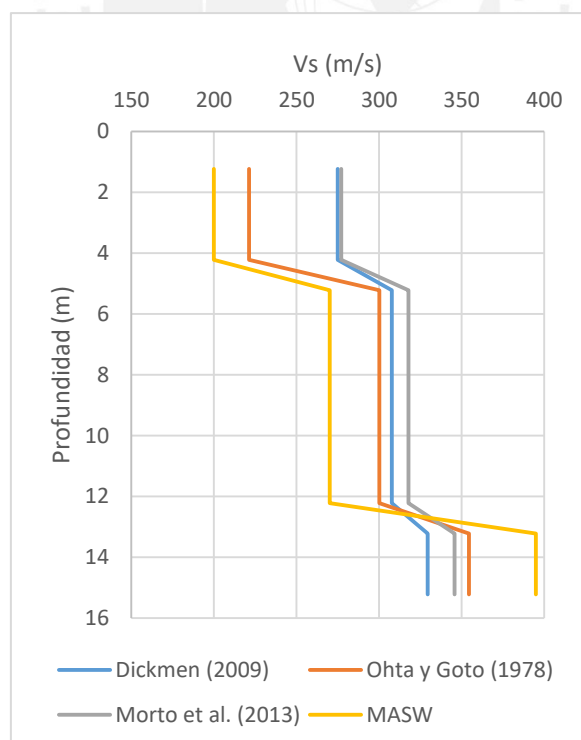


Figura 3.12: Módulo de Elasticidad en función de la profundidad

El módulo de reacción de Matlock y Reese emplea el constante de proporcionalidad  $n_h$ , el diámetro y la profundidad. La constante de proporcionalidad es hallada como el promedio de las 3 ecuaciones mostradas en el capítulo anterior. Todos los parámetros elegidos en los diferentes estratos se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Resumen de Parámetros del suelo por estrato

<b>Estratos</b>	<b><math>\omega</math> (%)</b>	<b><math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\phi</math> (°)</b>	<b><math>K_p</math> (-)</b>	<b><math>E</math> (MPa)</b>	<b><math>\nu</math> (-)</b>	<b><math>n_h</math> (MN/m<sup>3</sup>)</b>
Estrato 1 (0.00m – 5.00m)	9.25	17.17	40.99	5.63	18.87	0.29	11.83
Estrato 2 (5.00m – 13.00m)	18.19	17.17	39.61	5.35	35.75	0.30	14.81
Estrato 3 (13.00m – 16.00m)	21.47	17.66	38.43	5.11	78.14	0.29	17.14

El módulo de reacción  $k_h$  que se presenta a lo largo de nuestro suelo será hallado mediante las ecuaciones mostradas (3.8, 3.9, 3.10 y 3.11). Este módulo no es adjuntado en la tabla de resumen ya que dos de sus correlaciones varían con respecto a la profundidad, por lo que no existe un valor de  $k_h$  por estrato. Antes de caracterizar los módulos de reacción tenemos que conocer ciertas propiedades del pilote, ya que de estas dependen los módulos de reacción. Dichas propiedades se aprecian la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Datos del pilote

<b>Acero</b>	<b>Grado</b>	<b>Diámetro (m)</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Inercia (m<sup>4</sup>)</b>	<b>E (MPa)</b>
A572	50°	0.6096	9.2	0.00106112	200000

El módulo de Matlock y Reese por estrato, estaría expresado entonces como:

$$k_h = n_h i \left( \frac{z}{0.6096} \right) \quad (3.8)$$

El módulo de reacción constante por estrato, estaría expresado entonces como:

$$k_h = \frac{3E_s i}{2r_i} \quad (3.9)$$

El valor de módulo de reacción según Bowles (1995), se recomienda valores entre 250 y 400 dependiendo de la densidad del suelo. Mientras el suelo sea más denso mayor será su módulo, teniendo esto en cuenta escogimos los valores que se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Módulo de reacción

<b>Estrato</b>	<b>k (MN/m<sup>3</sup>)</b>
Estrato 1 (0.00m – 5.00m)	300
Estrato 2 (5.00m – 13.00m)	350
Estrato 3 (13.00m – 16.00m)	400

El módulo de reacción lineal por estrato, estaría expresado entonces como:

$$k_h = 0.3194 k_i \left( \frac{z}{r_i} \right) \quad (3.10)$$

El módulo de Vesic por estrato, estaría expresado entonces como:

$$k_h = 0.5785 \left( \frac{E_s i}{(1 - \nu i^2)} \right) (E_s i^{1/2}) \quad (3.11)$$

Los valores que están seguidos por una  $i$ , es porque varían de estrato en estrato. Se muestra a continuación de forma gráfica como varía el módulo de reacción, tanto en todos los estratos; como hasta los 8.8 m, valor de máxima profundidad del pilote.

En el análisis por el método p-y se utilizara el módulo de reacción determinado por Matlock y

Reese; sin embargo, en el análisis paramétrico se compararán los resultados entre los cuatro valores que podemos observar en la Figura 3.13.

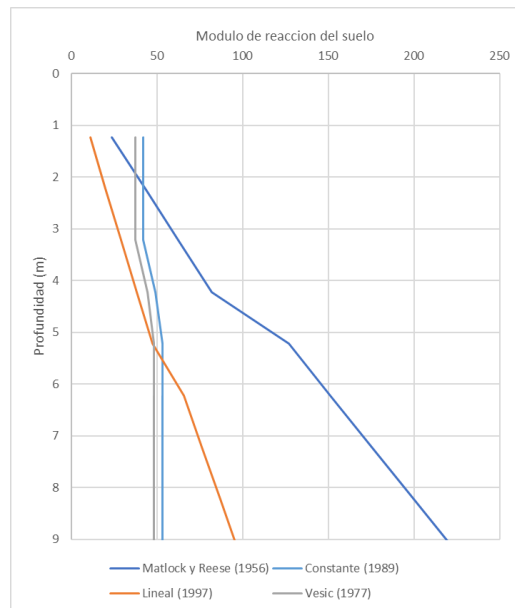
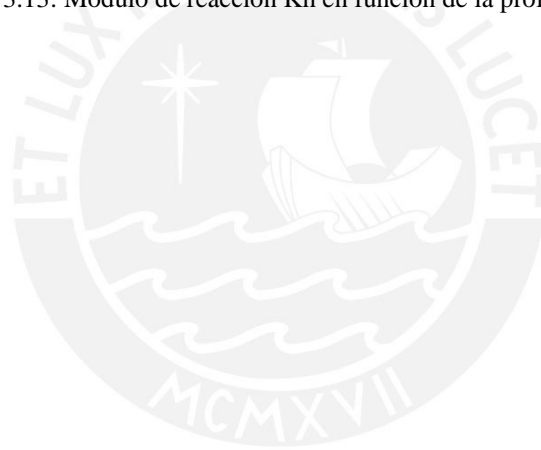


Figura 3.13: Módulo de reacción Kh en función de la profundidad



## 4. Análisis por el método de pseudoestático y el método p-y

### 4.1. Aspectos generales del diseño

La carga horizontal es una sollicitación que tiene una presencia importante en obras portuarias que se encuentren en zonas sísmicas o muros pantalla de pilotes. Debido a que simplemente su análisis no puede ser eludido, diferentes métodos han sido propuestos para poder estimar la respuesta del elemento. Dos de estos métodos son presentados a continuación:

### 4.2. Análisis por el método pseudoestático

El método de Broms se formula considerando que el pilote tiene rigidez infinita, de esta manera el pilote gira hasta un punto en el cual falla el suelo. Esta asunción se convierte cada vez menos verdadera mientras se incrementa la longitud del pilote. Debido a que mientras mayor es la longitud, menor es la rigidez del mismo, por lo que en este caso la falla del pilote ensayado se define por las características del suelo y del pilote. Por este motivo se aplican las ecuaciones de Meyerhoff y Broms, adecuadas para una falla por fluencia del pilote:

Método de Broms:

$$H_u = 1.5\gamma BK_p Z_r^2; M_{max} = H_u(e + \frac{2}{3}Z_r); Z_r = 0.82 \sqrt{\frac{H_u}{B\gamma K_p}} \quad (4.1)$$

Método de Meyerhoff:

$$H_u = 0.12\gamma BL_e^2 K_p; L_e = L1.65K_{rs}^{0.12}(1); K_{rs} = \frac{E_p I_p}{E_h L^4} \quad (4.2)$$

Dónde: B = Diámetro del pilote, e = Excentricidad,  $\gamma$  = Peso específico,  $E_p$  = Rigidez,  $E_h$  = Rigidez,  $I_p$  = Inercia,  $Z_r$  = Profundidad del pilote donde se produce el fallo,  $K_{rs}$  = Relación entre rigidez del pilote y del suelo,  $L_e$  = Longitud efectiva,  $H_u$  = Carga última,  $K_p$  = Rigidez.

#### 4.2.1. Resultados del método de pseudoestático

Los métodos estáticos no pueden trabajar con más de un estrato, por lo que se halla un promedio ponderado de las propiedades hasta una profundidad de 8.8 m, como se observa en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Cálculo del promedio de los parámetros geomecánicos

Estratos	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$K_p$	E(MPa)	$n_h$ (MN/m <sup>3</sup> )
Estrato 1 (0.00m – 5.00m)	17.17	40.99	5.63	18.87	11.83
Estrato 2 (5.00m – 8.80m)	17.17	39.61	5.35	35.75	14.81
Estrato promedio	17.17	38.14	5.21	24.12	13.11

Para el análisis rígido, se emplearon los parámetros geométricos del pilote, parámetros como la longitud enterrada el diámetro y la excentricidad en la cual se aplica la carga. Estos valores se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Parámetros geométricos del pilote

Longitud (m)	Diámetro (m)	Excentricidad (m)
8.8	0.6096	0.4

Las propiedades del acero A572 se encuentran normalizadas por la ASTM. Adicionalmente cuando el punto de falla es el pilote, es necesario conocer el momento de fluencia del mismo. Éste es un valor que depende de la geometría de la sección y de las propiedades del material, entonces se ingresan estas propiedades en el programa ETABS tal como se observan en la

Tabla 4.3, para poder hallar una gráfica de momento curvatura y una tabla tabulada, donde el primer punto es el punto fluencia, tal como se ve en la Figura 4.1.

El diagrama de momento-curvatura muestra la magnitud del momento de fluencia de la sección del pilote ensayado, este momento es necesario para la formulación de Broms ya que este valor limita la resistencia propuesta por el método.

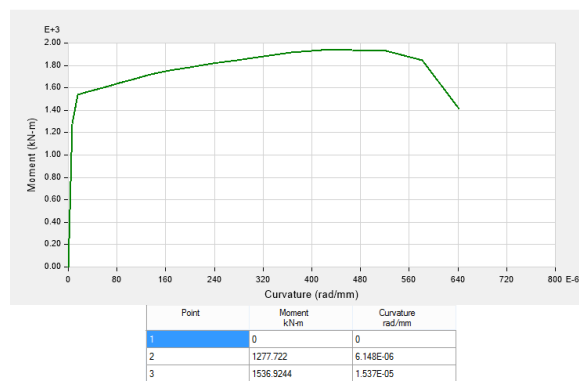


Figura 4.1: Diagrama de momento curvatura (ETABS, 2019)

Tabla 4.3: Propiedades del acero (ASTM, 2018)

Acero A572 Gr50°	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidad (MPa)	Módulo de Poisson	Momento de fluencia (kN.m)	Inercia de la sección (m <sup>4</sup> )
Diámetro 24" Espesor 0.5"	7849.047	2.00E5	0.3	1277.72	0.00106112

El método de Broms permite conocer el desplazamiento lateral utilizando el valor adimensional  $\eta$ , el cual se calcula de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{5 \sqrt{n_h}}{\sqrt{E_p I_p}} \quad (4.3)$$

Se obtuvo un valor de  $\eta L = 5.04$  y  $\frac{e}{L} = 0.043$ , el cual se visualiza en la Figura 4.2.

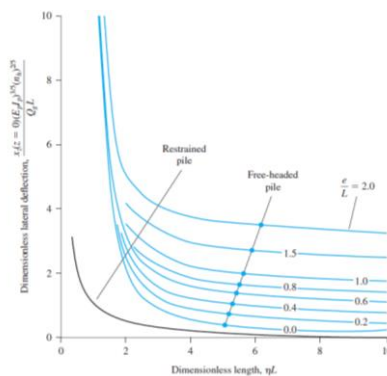


Figura 4.2: Deflexión Broms (Das, 2019)

Luego de conocer todas las propiedades del suelo y pilote se procede a aplicar las ecuaciones de Meyerhoff y Broms. En la Tabla 4.4 se presenta un resumen de los resultados, se observa una gran diferencia entre los resultados de ambos métodos

Tabla 4.4: Resultados de los métodos estáticos

Método	Carga horizontal última (kN)	Carga horizontal última (ton)	Desplazamiento (cm)
Broms	583.13	59.44	2.85
Meyerhoff et al.	301.85	30.77	--

#### 4.2.2. Limitaciones del resultado

- Los métodos pseudoestáticos no pueden trabajarse para más de un estrato, por lo tanto, se resuelve con un valor promedio, tanto de coeficiente de fricción y de peso específico. Se asume que el pilote gira, pero no se deforma, si bien trata de solucionarlo aumentando un valor de momento de fluencia, esto no tiene la suficiente rigurosidad analítica que merece.
- Broms recomienda que las fórmulas para pilote rígido se usen cuando exista una relación aproximada de  $L/b$  igual a ocho, para este estudio, el primer resultado es meramente una curiosidad, sin embargo, el valor sólo se incrementa tanto como se incrementara el momento de fluencia dividido entre la longitud total.
- El método pseudoestático no se aplica para litologías heterogéneas. No se conocen los esfuerzos para cargas de servicio, como tampoco se pueden calcular deflexiones y deformaciones.
- Si las propiedades del suelo varían mucho, el resultado es mucho menos confiable. Además, las ecuaciones del método pseudoestático son lineales por lo que mientras se sigan incrementando las propiedades geométricas o propiedades mecánicas del suelo, más incrementa la resistencia del pilote.

#### 4.3. Análisis por el método $p-y$

Para la resolución mediante el método  $p-y$  se utiliza el programa GEO5® que brinda diferentes opciones para el valor de  $n_h$ ,  $k_h$  según los distintos autores. Sin embargo, se usan las ecuaciones planteadas por Matlock y Reese y en el siguiente capítulo se discute como cambian las respuestas según las ecuaciones mencionadas.

##### 4.3.1. Resultados del método $p-y$

Los primeros parámetros definidos son los parámetros geométricos, profundidad de cada uno de los estratos y geometría del pilote, tal como se presenta en la Figura 4.3.

Dimensiones básicas del pilote

Tipo :

Diámetro : d =  [m]

Longitud : l =  [m]

Espesor : t =  [mm]

Coef. de reducción base : c =  [-]

Ubicación del pilote

Altura sobre terreno final (TF) : h =  [m]

Prof. del terreno final (TO-TF) : h<sub>z</sub> =  [m]

Material de pilote :

Tecnología :

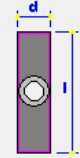


Figura 4.3: Geometría del pilote (GEO5, 2019)

En el segundo paso, se definen las propiedades del acero (esfuerzo de fluencia y esfuerzo último). En la Figura 4.4 a) y la Figura 4.4 b) se presenta el diagrama esfuerzo-deformación en forma tabulada, esto se utilizó para modelar el comportamiento plástico del acero, al igual que en el método *p-y*, el modelo numérico también considera el comportamiento pasado la zona elástica. En la Tabla 4.5 se muestra un resumen de las propiedades del acero A572.

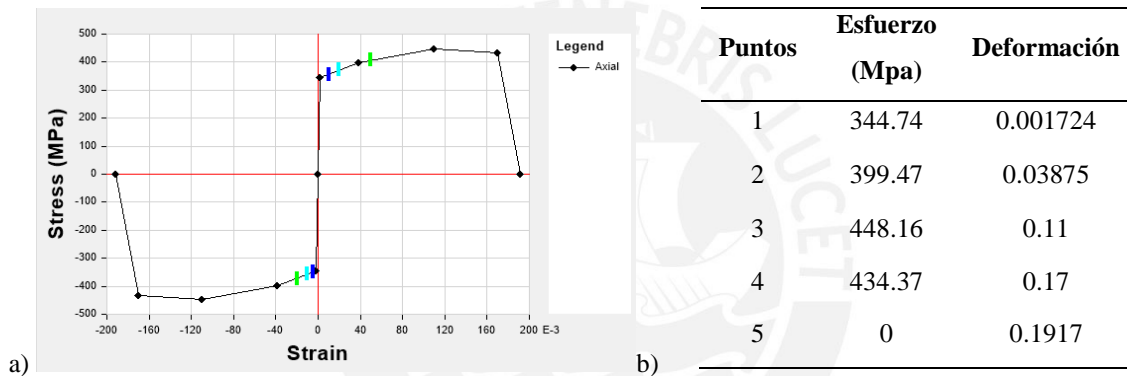


Figura 4.4: a) Esfuerzo vs deformación b) Puntos notables de la gráfica

Tabla 4.5: Propiedades del acero (ETABS, 2019)

Acero A572 Gr50°	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidad (MPa)	Módulo de Poisson (-)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)
Diámetro 24"	7849.047	2.00E5	0.3	344.74	448.16
Espesor 0.5"					

En el tercer paso, se asigna la constante de proporcionalidad al suelo; esta propiedad determina el valor del módulo de reacción *y*, por lo tanto, el módulo de elasticidad del suelo a diferentes profundidades. En Tabla 4.6 se presenta el módulo de reacción.

Tabla 4.6: Módulo de reacción del suelo

Estratos	<i>n<sub>h</sub></i> (MN/m <sup>3</sup> )
Estrato 1 (0.00 – 5.00)	11.83
Estrato 2 (5.00 – 8.80)	14.81

En la Figura 4.5 y Tabla 4.7 se presenta la respuesta a lo largo del pilote, luego de aplicado una carga de 30 t (294.3 kN).



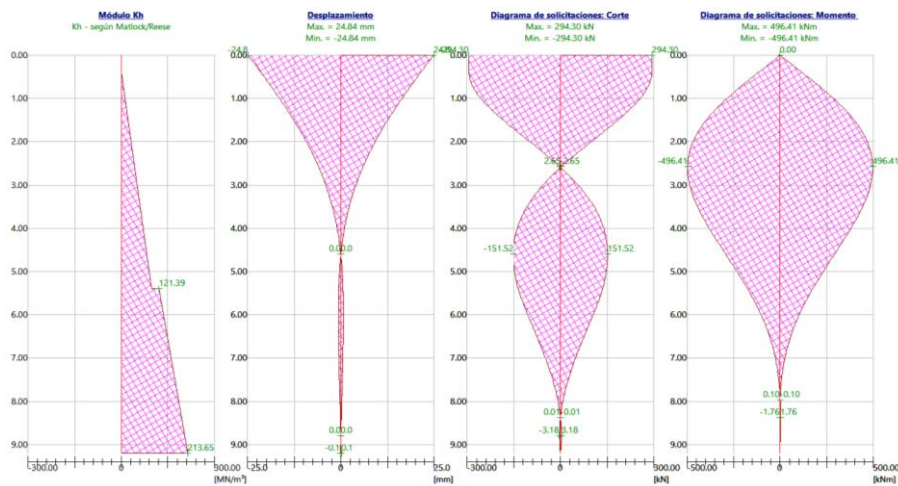


Figura 4.5: Resultados de módulo de reacción ( $K_h$ ), desplazamiento, fuerza cortante y momento con función a la profundidad (GEO5, 2019)

En la Tabla 4.7 se aprecian los resultados del modelo, se observa que los desplazamientos son bastante acertados con respecto a los resultados del ensayo (3.16 cm), en el caso del momento, este se encuentra muy lejos de la fluencia, en la figura 4.5 se aprecia que el momento máximo se encuentra aproximadamente a 2.5 m de la zona de aplicación de la carga mientras que los desplazamientos por debajo de 4.5 m son básicamente inexistentes.

Tabla 4.7: Resumen de resultados (GEO5, 2019)

Espesor	Carga aplicada (kN)	Desplazamiento (cm)	Momento (kN.m)
1/2"	294.3	2.48	496.41

#### 4.3.2. Limitaciones del resultado

- El método  $p$ - $y$  trabaja con una relación esfuerzo-deformación lineal, el suelo se asume con un comportamiento elástico lineal. Esta asunción no es correcta en especial para los tramos de suelo más cargados, sin embargo, el comportamiento plástico puede ser modelado utilizando métodos numéricos.
- No se puede hallar simplemente un valor de carga máxima, sin embargo, se asume que el pilote falla cuando presentan deflexiones elevadas o cuando las cargas cortantes o momentos flectores son superiores a los permitidos por el mismo elemento estructural.
- El método  $p$ - $y$  discretiza un estrato en una cantidad  $n$  de puntos, esta cantidad es igual a 30 en el programa GEO5. En el estudio, el pilote tiene 9.2 m. Al no ser una discretización tan fina se puede apreciar esta como una fuente de error.
- El método  $p$ - $y$  necesita parámetros elástico-lineales de un material que en realidad no es ni elástico ni lineal, además se hallan estos mismos parámetros con correlaciones semi empíricas y con un ensayo geofísico, por lo que tanto en su concepción como en su ejecución se puede encontrar una fuente de error.

## 5. Análisis numérico

### 5.1. Geometría del modelo y propiedades de los materiales

Las dos geometrías que se modelan en el programa Abaqus® son el pilote y la litología. En la Figura 5.1 a), se presenta la geometría del modelo numérico realizado. El pilote tiene una sección tubular con un diámetro exterior de 24" (espesor de ½") y longitud de 9.2 m, sin embargo 8.80 m se encuentran enterrados y la carga se aplica a 0.40 m desde el nivel de la superficie. La geometría del modelo es de un diámetro de 5 m y de profundidad de 16 m. Las propiedades del suelo y del acero del pilote están descritos en el Capítulo 3.

Para el acero se utiliza las propiedades normalizadas del ASTM (ver Tabla 4.3). Figura 5.1 se presenta el modelo, donde está el pilote hueco de acero y los 3 suelos. Se nota la simetría en la geometría.

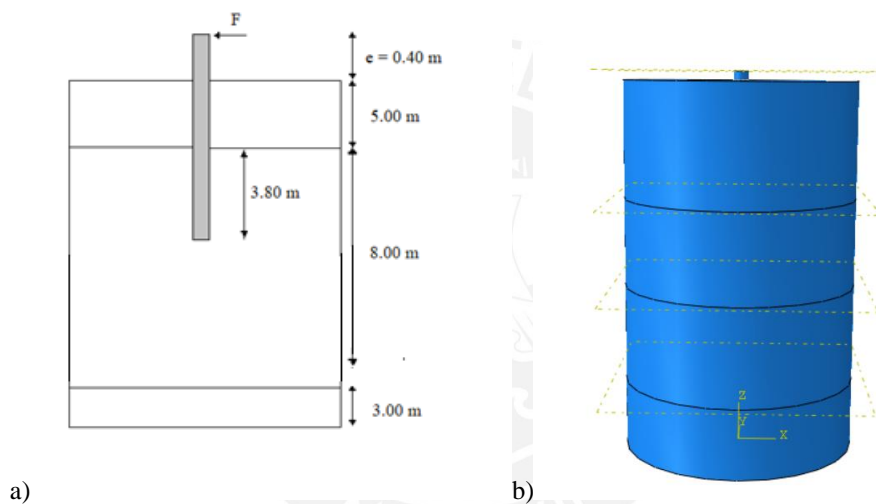


Figura 5.1: a) Configuración del problema b) Modelo en ABAQUS.

### 5.2. Interacción de suelo-pilote

ABAQUS® asume que no existe fricción alguna entre dos o más elementos en contacto, por lo que se debió definir un modelo de fricción. En el análisis, se asume que el pilote se encuentra en contacto perfecto con el suelo. La interacción entre la superficie del pilote y el suelo es capaz de ser descrita utilizando la interface *penalty-type*. (Helwany, 2009)

El ángulo de fricción de la interacción superficie de acero y el suelo se define con la biografía de la Tabla 5.1 del NAVFAC DM 7.2 (Foundation and Earth Structures, U.S. Department of the Navy, 1984).

Tabla 5.1: NAVFAC (Foundation and Earth Structures, U.S. Department of the Navy, 1984)

Material del pilote	$\phi$ (°)
Pilotes de acero	20
Pilotes de madera	0.75 $\phi$
Pilotes de concreto	0.75 $\phi$

### 5.3. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno definen los límites hasta los cuales existe una respuesta física de parte de las cargas actuantes. Esta condición en un punto en el cual el suelo ya no presenta ni desplazamiento ni giro. La base del estrato de arena está empotrado en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , mientras que toda la cara lateral ( $x$  y  $y$ ) el desplazamiento está restringido, tal como se presenta en la Figura 5.2.

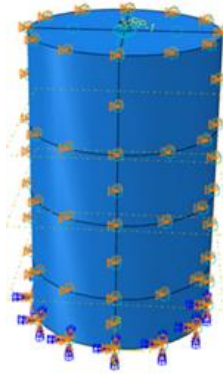


Figura 5.2: Condiciones de contorno empleado en el modelo (ABAQUS, 2019).

### 5.4. Discretización de los elementos

En la Figura 5.3 se presenta la forma y la técnica utilizada en el modelo. En la Figura 5.4 a) se presenta el modelo discretizado, se aprecia la simetría y el tamaño reducido de los elementos. En la Figura 5.4 b) se aprecia una vista en planta.

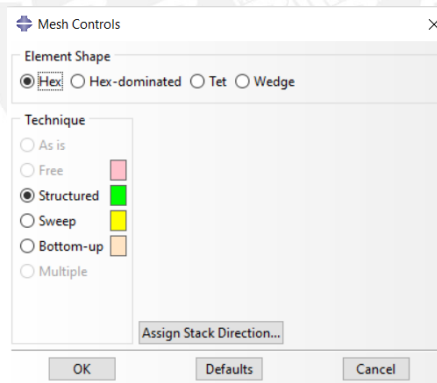


Figura 5.3: (ABAQUS, 2019)

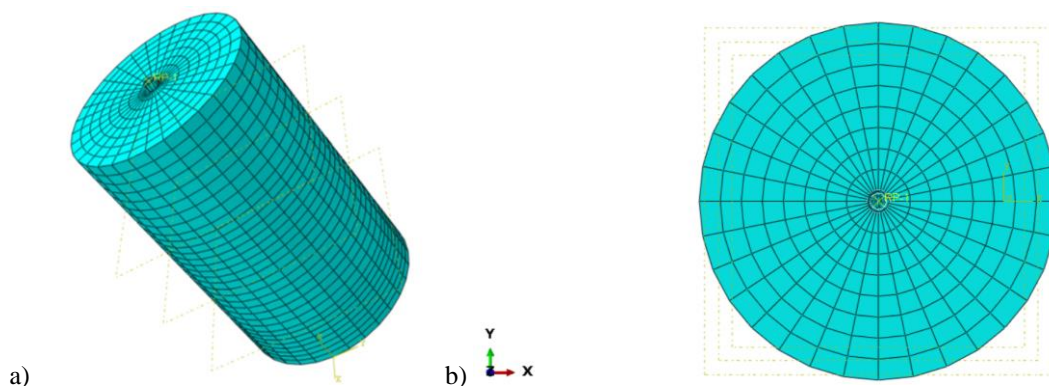


Figura 5.4: Enmallado vista isométrica (ABAQUS, 2019)

## 5.5. Asignación de la carga y simulación numérica.

El último paso antes de realizar la simulación es asignar una carga que corresponde a un valor de 294.30 kN, como se muestra en la Figura 5.5. La simulación se corre en dos pasos, el primero es conocido como geostático, donde se produce el equilibrio estático del terreno. Esta opción asegura la condición de esfuerzos iniciales en todos los elementos en todos los estratos, sin que el suelo llegue a la zona de fluencia que en este caso está limitada por el modelo Mohr-Coulomb.

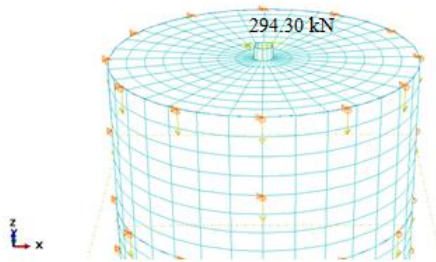


Figura 5.5: Aplicación de la carga (ABAQUS, 2019)

Realizadas las consideraciones anteriores se procede a ejecutar el programa, obteniendo como resultado un desplazamiento máximo de 3.098 cm, tal como se muestra en la Figura 5.6. Además, se aprecia que los desplazamientos solo llegan hasta aproximadamente 2.5 metros a la redonda del pilote (campo de desplazamiento).

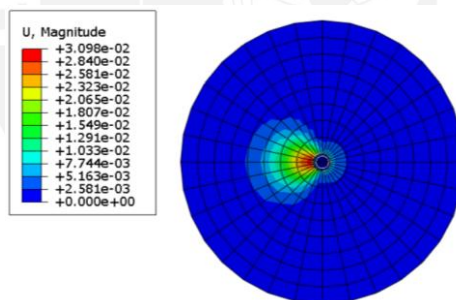


Figura 5.6: Campos de desplazamiento (ABAQUS, 2019)

En la Figura 5.7 se presenta la fuerza vs desplazamiento y el desplazamiento a lo largo de la longitud del pilote. Se puede observar que aproximadamente a una profundidad de 4.5 m, se encuentra el punto de inflexión en la deformada del pilote.

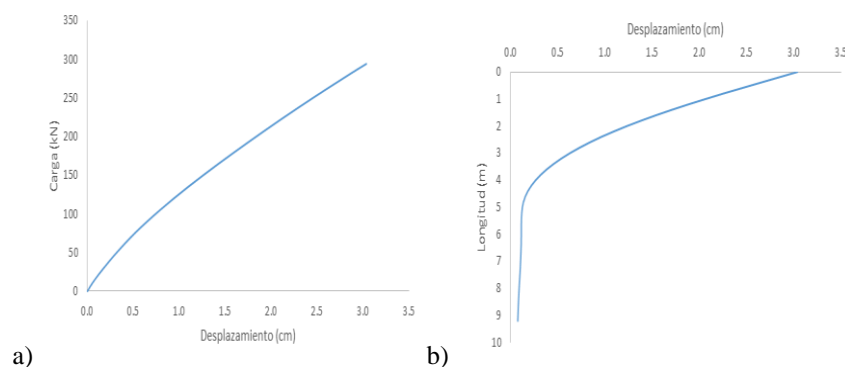


Figura 5.7: a) Fuerza vs Desplazamiento, b) Deformada del pilote

## 6. Análisis del ensayo de carga lateral

### 6.1. Instalación e instrumentación

En primer lugar, se instalaron los pilotes hincados con el martillo PILECO D46-32<sup>1</sup> de 24” de diámetro y 10.40 m de longitud en el almacén de la empresa PSV, situado en Chilca. El pilote es hincado con una razón de 40 a 60 golpes por minuto a nivel de rechazo. Se hincaron dos pilotes más con el mismo martillo de una longitud similar, ubicados lo suficientemente lejos del pilote de prueba, para que no tenga influencia alguna sobre el mismo, que eran los pilotes de reacción. Los protocolos de hincados del pilote de prueba (PP1) y de un pilote de reacción (PR1) se encuentran en el anexo 9. Además se coloca una viga apoyada en los dos pilotes de reacción y el PP1, para poder simular un mecanismo de reacción que evite deformarse y desplazarse y así obtener los desplazamientos reales del pilote.

Para efectos del ensayo, se toma como mecanismo de reacción la combinación de dos pilotes hincados en conjunto con una viga apoyada en éstos y para asegurar la estaticidad del mecanismo se coloca una grúa de 100 toneladas detrás para que la viga se apoye y no genere ninguna deformación. En la Figura 6.1 se presenta un esquema a detalle de la instalación de la prueba de carga lateral.

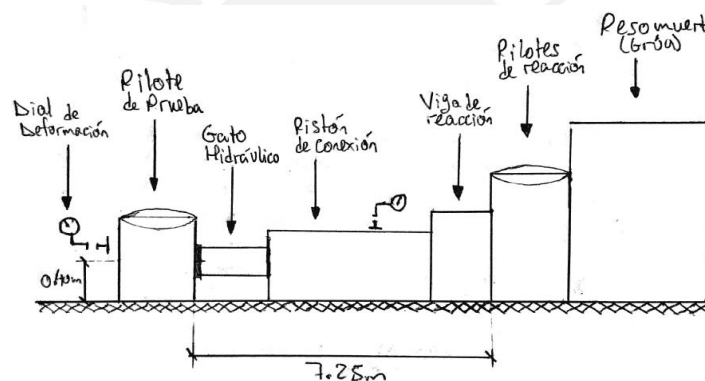


Figura 6.1: Esquema de la instalación del ensayo de carga lateral.

Una vez definido e instalado el mecanismo de reacción en conjunto con el pilote a ensayar, se procede a instalar los instrumentos de medición y el mecanismo de conexión (Figura 6.2) en el pilote tales como; el pistón, los platos metálicos, el gato hidráulico y los deformímetros digitales en las posiciones que requiere la investigación: 3 a la altura del gato hidráulico (a 0.4 m del suelo), dos dentro del pilote (a 1 y 2 m de la superficie del suelo, medidos hacia el interior del mismo) y el último en el pistón de conexión. En la Figura 6.3 se observa el mecanismo de reacción utilizado.

<sup>1</sup> PILECO D46-32: Marca y serie del martillo utilizado para hincar los pilotes.





Figura 6.2: Instrumentación de la prueba de carga:

a) deformímetros digitales (lectura de desplazamientos) y b) pistón de conexión y cilindro hidráulico.

La instalación del ensayo finaliza con la colocación completa de la instrumentación, es decir que primero se arma el mecanismo de reacción (viga + 2 pilotes + grúa de 100 toneladas) tal como se observa en la Figura 6.3, luego se procede a soldar el pistón de conexión hacia las planchas metálicas para que pueda tomarse como un solo elemento y así evitar desplazamientos relativos.



Figura 6.3: Mecanismo de Reacción (grúa).

Finalmente, se aplica la carga de manera progresiva al pilote. Los 2 primeros aumentos se hacen a los 10 minutos, el siguiente aumento de carga se hace a los 15 minutos, luego se carga en intervalos de 20 minutos hasta llegar a la carga última, para finalmente descargar el pilote en intervalos de 10 minutos. El detalle se comenta en el subcapítulo 6.3 de resultados.

## 6.2. Prueba de Carga Dinámica (PDA)

Cabe mencionar que antes de realizar en ensayo de carga lateral, al pilote ensayado se realizó una prueba de carga dinámica (PDA), la cual se encuentra en el anexo 10, para definir la resistencia real por compresión y así tener una referencia para saber de qué magnitud es la carga de falla para las cargas horizontales, tomando en cuenta que la resistencia lateral es aproximadamente el 10% de la resistencia axial.

La data tomada por los acelerómetros y deformímetros fue procesada y convertidas a fuerza y velocidad por el PDA, y guardadas digitalmente en el PDA para su procesamiento posterior. Estos registros de fuerza y de velocidad fueron observados en la pantalla del PDA para evaluar la calidad de los datos, la integridad del pilote y los aspectos cualitativos de la resistencia del suelo.

Para realizar la PDA se tomaron mediciones dinámicas de deformación y de aceleración a 1.5

veces el diámetro como mínimo por debajo de la cabeza del pilote durante los impactos del martillo de hincado. Esta distancia se elige en función de la separación mínima entre el impacto/pilote y los sensores, y la carga requerida para evaluar en el pilote.

Se sujetaron con pernos 4 deformímetros y 4 acelerómetros emparejados en lados opuestos del pilote para registrar la deformación unitaria y la aceleración, respectivamente, y así obtener resultados axiales promedio, las señales de deformación unitaria y la aceleración.

El programa de instrumentación dinámica tiene por objetivos principales verificar eventuales fallas estructurales y evaluar la capacidad de carga axial de los pilotes. De esa forma se realiza la instrumentación del pilote PP1.

En el ensayo dinámico del pilote y monitoreo se usa un equipo de *Pile Driving Analyzer*<sup>2</sup> (PDA), Modelo PAX 4, el cual incluye un programa para obtener en tiempo real una estimación aproximada de la capacidad de carga última del pilote.

Los objetivos del ensayo dinámico incluyen el monitoreo del desempeño del martillo y del sistema de hincado, las tensiones durante el hincado del pilote, los desplazamientos del pilote durante el hincado y la capacidad de carga última del pilote. El ensayo dinámico se ejecuta con un equipo PDA, fabricado por Pile Dynamics, Inc. de Cleveland, Ohio, Estados Unidos. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- ✓ Carga ultima por fricción: 89.9 t
- ✓ Carga ultima por punta: 134.6 t
- ✓ Carga total última: 224.5 t

Ante la carga ultima de 224.50 t, se utiliza el 10% de ésta para estimar aproximadamente el valor de la carga ultima horizontal, según el código técnico español para diseño de cimentaciones (CTE, 2018), por lo que ésta sería 22.45 t de carga última obtenida en el ensayo. Finalmente, la carga total ultima lateral aproximada sería de 22.45 t.

Es por esta razón, que se pudo tomar de referencia 25 t obtenidas del ensayo PDA realizado antes del de carga lateral, además de tener en cuenta la bibliografía del CTE. Pero para efectos del ensayo se aplica la carga hasta 30 t porque al aplicarla hasta 25 t no se logró observar a simple vista una deformación en el pilote. Es por esto que se decide aplicar un poco más de carga para llegar a un punto muy cercano a la falla haciendo que el pilote se empiece a deformar a simple vista y logrando los objetivos del ensayo.

### **6.3. Resultados del ensayo**

Se realiza un ensayo de carga lateral a un pilote, el cual se basa en incrementar la carga hasta 30 t, teniendo en cuenta que ésta sería nuestra carga última, lo cual da como resultado una gráfica de carga-descarga vs desplazamientos, muy parecida a la esperada. Se puede ver en la Tabla 6.1 los datos de

---

<sup>2</sup> Pile Driving Analyzer: Es el equipo utilizado que mide las velocidades y fuerzas, las cuales son utilizadas en el programa CAPWAP, el cual nos da como resultado la fricción, punta y la carga admisible.

entrada del ensayo tomados por 3 diales de deformación.

Tabla 6.1: Resultados del ensayo de carga lateral

<b>Carga</b> <b>(t)</b>	<b>Tiempo</b> <b>(min)</b>	<b>Lectura</b> <b>Dial 01 (mm)</b>	<b>Lectura</b> <b>Dial 02 (mm)</b>	<b>Lectura</b> <b>Dial 03 (mm)</b>
0	--	0.00	0.00	0.00
3.75	10	2.80	3.42	3.34
7.50	10	4.30	5.31	5.14
11.25	15	7.40	8.97	8.71
15.00	20	11.39	13.63	13.30
18.75	20	14.34	16.97	16.62
22.50	20	18.22	21.40	20.96
25.50	20	21.87	25.45	25.10
27.00	20	23.74	27.44	27.15
28.50	20	25.52	29.47	29.17
30.00	60	27.59	31.64	31.57
22.50	10	26.61	29.98	29.06
15.00	10	24.22	26.74	25.06
7.50	10	18.91	20.29	18.65
0.00	--	9.67	10.00	8.33

Las mediciones de los diales de deformaciones colocados en distintas posiciones; los tres primeros (Dial 01, Dial 02 y Dial 03), que son los diales de deformación con los que se trabajan en las gráficas, se colocan afuera del pilote a una distancia de 40 cm del suelo tal como se aprecia en la Figura 6.4b). Los dos diales que le siguen (Dial 04 y Dial 05) se colocan adentro del pilote a una distancia de 1 m y de 2 m, respectivamente, como se puede observar en la Figura 6.4c). El último (Dial 06, que no se tomó en cuenta para el ensayo) se coloca en el pistón de conexión, tal como se ve en la Figura 6.4a), para tener alguna referencia de si el mecanismo de reacción no se desplaza y para determinar qué tanto varían las mediciones si se colocan diales de deformación al interior del pilote a una mayor profundidad.

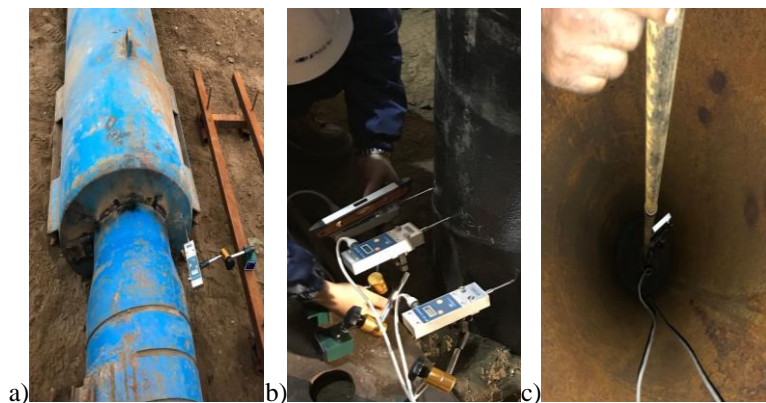


Figura 6.4: Instrumentación de la prueba de carga: (a) Dial de deformación 6 (b) Diales de deformación 1, 2 y 3 (c) Diales de deformación 4 y 5

En la tabla donde se mide la deformación del pilote, se puede apreciar que éste empieza a fallar



cuando llega a la carga de 30 t ya que la lectura del dial de deformación comienza a disminuir en la siguiente medición, por lo que se obtiene como resultado que el desplazamiento lateral máximo es de 30.27 mm, tal como se observa en las Tabla 6.2, la deformación máxima igual a 30.27 mm por lo que se toma en cuenta el valor más crítico que es éste y se utiliza para realizar el análisis.

Tabla 6.2: Resultados promedio (Dial 01, Dial 02 y Dial 03) del ensayo de carga lateral

Carga (ton)	Tiempo (min)	Lectura Promedio
		Diales 01, 02 y 03 (mm)
0	--	0.00
3.75	10	3.19
7.50	10	4.92
11.25	15	8.36
15.00	20	12.77
18.75	20	15.98
22.50	20	20.19
25.50	20	24.14
27.00	20	26.11
28.50	20	28.05
30.00	60	30.27
22.50	10	28.55
15.00	10	25.34
7.50	10	19.28
0.00	--	9.33

Para tener un mejor detalle de lo que ocurre con el pilote, en la Figura 6.5 a) y b) se presentan las gráficas obtenidas de carga vs desplazamientos.

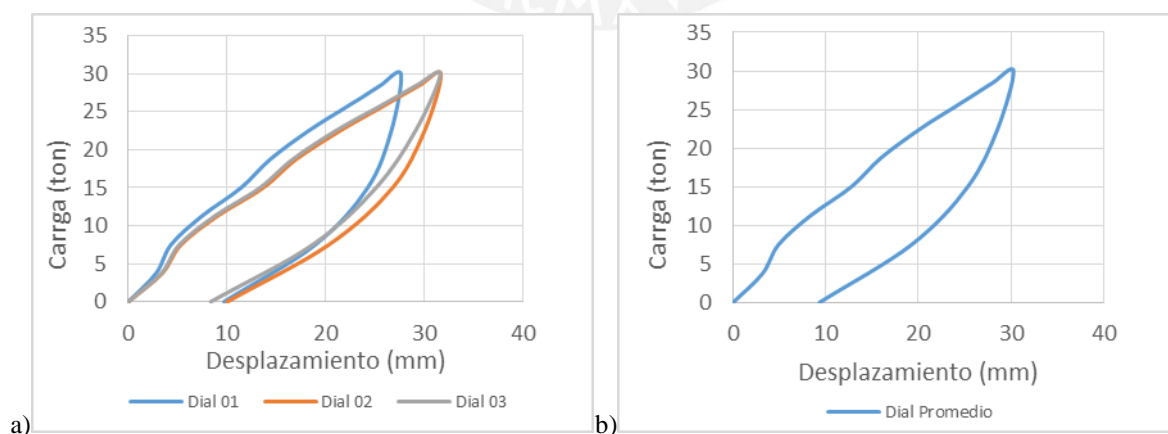


Figura 6.5: a) Carga vs desplazamientos y b) Carga vs desplazamiento promedio (Dial 01, Dial 02 y Dial 03)

Por otra parte, también se tiene en cuenta la deformación a 1 m y a 2 m de profundidad del suelo, con los dos diales de deformación colocados al interior del pilote, para medir cuánto varían las deformaciones, considerando el factor de la profundidad, se obtuvo la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Resultados del ensayo de carga lateral a diferentes profundidades (-1m y -2m)

Carga (t)	Lectura Dial 06 (mm)	Lectura Dial 05 (mm)	Lectura Promedio
	-2.00 m	-1.00 m	Diales 01, 02 y 03 (mm)
0	0.00	0.00	0.00
3.75	0.02	1.37	3.19
7.50	0.04	2.11	4.92
11.25	0.13	3.81	8.36
15.00	1.58	6.74	12.77
18.75	1.69	8.39	15.98
22.50	2.25	10.80	20.19
25.50	2.85	13.16	24.14
27.00	3.36	14.54	26.11
28.50	3.55	15.76	28.05
30.00	2.60	16.13	30.27
22.50	3.56	15.75	28.55
15.00	3.88	13.95	25.34
7.50	1.94	9.58	19.28
0.00	0.88	4.88	9.33

Se observa de las gráficas que a los -2 m el desplazamiento tiende a cero, por lo que se confirma la teoría de que el pilote presenta el comportamiento de un empotramiento en voladizo, es decir que sus deformaciones se asemejan a las de Figura 6.6 donde en a) se presenta una gráfica de las deformaciones con solo la carga y en b) con solo descarga a las profundidades de -1 m y de -2 m.

Entonces, el punto de mayor desplazamiento, es donde se aplica la carga y el punto de menor desplazamiento, es donde se empieza a formar el empotramiento a lo largo de la profundidad del pilote.

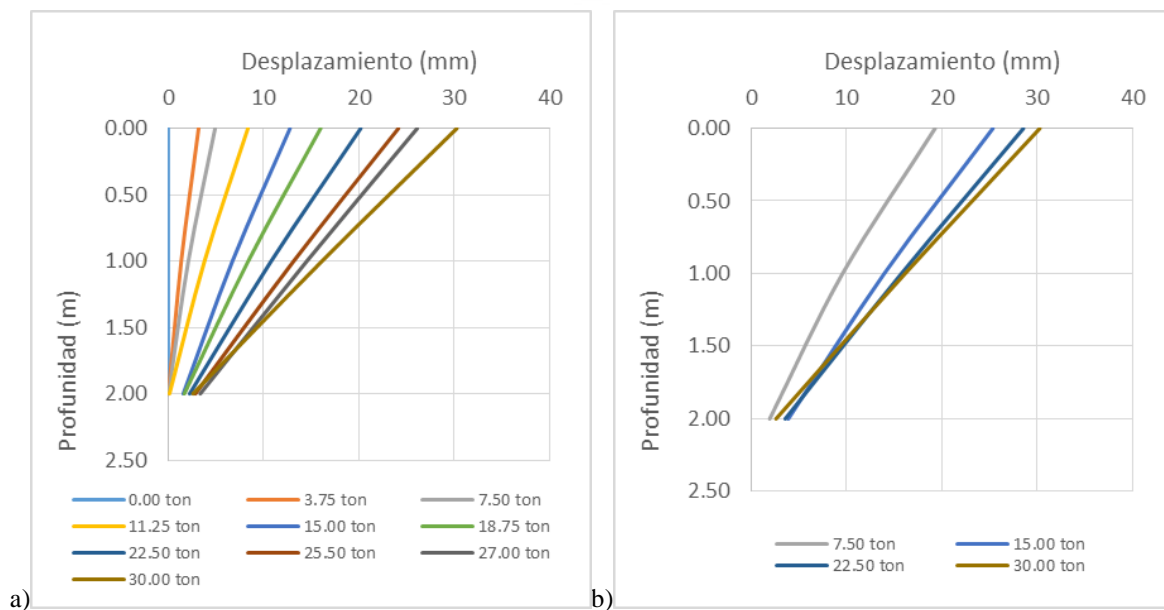


Figura 6.6: a) Desplazamientos vs profundidad en carga b) Desplazamientos vs profundidad en descarga

## 7. Análisis paramétrico

El análisis paramétrico de los métodos estudiados, sirve para poder cuantificar la incidencia de ciertas propiedades, con respecto a la respuesta y por lo tanto también como afecta en la resistencia tanto del suelo como del pilote. Para cuantificar la importancia de los parámetros se utiliza el factor  $P$ , que representa cuanto aumentará o disminuirá el resultado si se aumenta en 10% un parámetro. Un factor de  $P$  igual a 10 representa que el resultado del modelo se ha incrementado en un 10%, mientras un valor de 20 demuestra que el resultado se ha incrementado en un 20%.

$$P (\%) = \frac{f(1.1s)-f(s)}{f(s)} \quad (7.1)$$

### 7.1. Análisis mediante el método $p$ - $y$

#### 7.1.1. Longitud (L)

Se simula el modelo para diferentes longitudes de 3 m a 10 m, considerando las propiedades que se usaron en el capítulo 4, las cuales se presentan en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Parámetros del suelo y del pilote

Estrato	$n_h$ (MN/m <sup>3</sup> )	$E_p$ (MPa)	$I_p$ (m <sup>4</sup> )	$R_p$ (MNm <sup>2</sup> )
0.00 – 5.00	24.85	2E5	0.00106112	212.22
5.00 – 13.00	22.90	2E5	0.00106112	212.22

Dónde:  $E_p$  = Modulo de elasticidad del pilote,  $I_p$  = Inercia del pilote,  $n_h$  = Constante de proporcionalidad del suelo y  $R_p$  = Rigidez a la flexión

La propiedad que se modifica para calcular el valor de  $P$  (%) es la longitud.

Tabla 7.2: Influencia de la longitud en la respuesta del pilote

Longitud (m)	Desplazamiento (mm)	Momento (kN.m)	P desplazamiento (%)	P momento (%)
3	71.55	441.72	-20.66	7.23
4	37.98	542.76	-14.38	6.26
5	28.01	616.92	-6.32	3.55
6	25.45	651.19	-1.34	1.04
6.10	25.36	652.88	-1.10	0.86
6.15	25.32	653.61	-0.99	0.78
7	25.04	659.37	-0.04	0.08
8	25.03	659.93	-0.04	-0.01
9	25.02	659.90	-0.04	0.02
10	25.01	660.08	-0.04	-0.02

En la Tabla 7.2 se aprecia que aproximadamente cuando se tiene una longitud de 6.15 m el valor de  $P$  es menor a 1, lo que significa que al aumentar la longitud es en extremo ineficiente para aumentar la resistencia lateral. Este punto es llamado longitud crítica. La longitud crítica para un valor de  $R_p$  y  $n_h$  dados es igual a 6.15 m, tal como se presenta en la Figura 7.1.

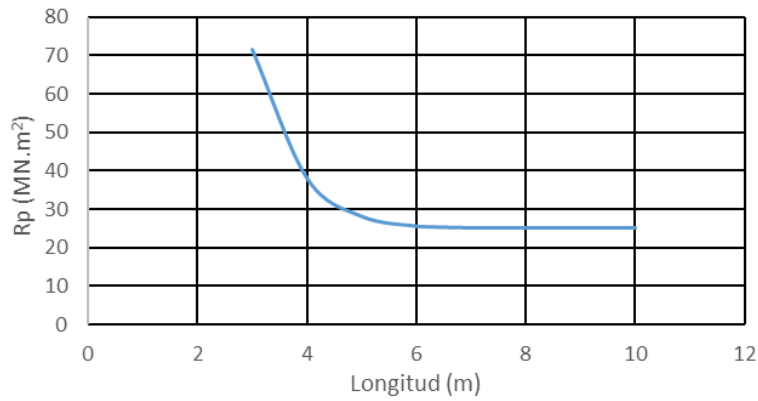


Figura 7.1 Longitud vs desplazamiento

La Figura 7.2 muestra la longitud crítica para diferentes valores de  $R_p$  y  $n_h$ . Las asunciones adicionales son  $e = 0$ , lo que significa que el tope del pilote se encuentra a nivel del suelo. Si el valor de excentricidad es mayor a cero, la longitud crítica aumenta mientras que si el pilote está enterrado a una profundidad ( $D_f$ ) el valor de la longitud crítica tiende a disminuir.

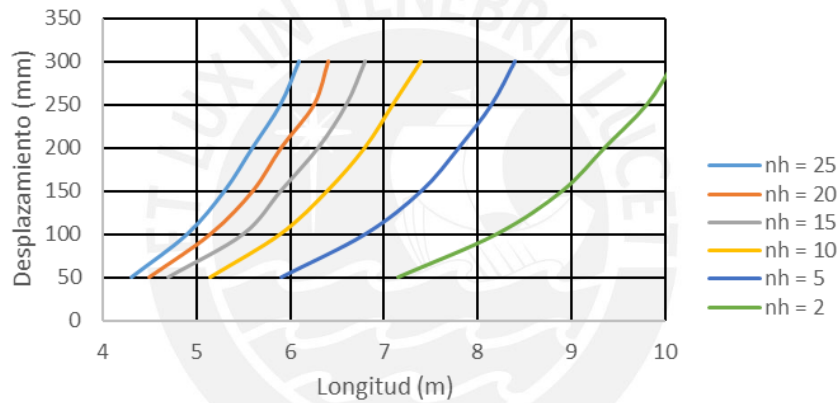


Figura 7.2 Longitud crítica vs  $R_m$

## 7.1.2. Parámetros geomecánicas

### 7.1.2.1. Módulo de reacción

Se muestra en la siguiente tabla cómo varían las respuestas para los diferentes módulos de reacción encontrados en la bibliografía, los cuales se calculan con los parámetros mostrados en la Tabla 3.5. Las respuestas de los diferentes métodos se muestran en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3: Comparación de las respuestas

$k_h$	Desplazamiento	$M_{max}$	%Variación	% Variación
	(mm)	(kN.m)	Reese Desp	Reese Mmax
Matlock / Reese	24.84	496.41	-	-
Constante	16.15	330.69	-35.0	-33.4
Lineal	29.27	521.36	17.8	5.0
Vesic	25.94	375.16	4.4	-24.4
$k_h$ Eprom	18.00	375.38	-27.5	-24.4
$k_h$ EMASW	25.37	421.11	2.1	-15.2

## 7.2. Análisis mediante el método estático

El método estático encuentra el valor de carga horizontal máxima aplicable. Dicho método está pensado originalmente para pilotes rígidos, cuya falla se presenta en el suelo, sin embargo, también se puede calcular la carga horizontal máxima para el momento en el que, el pilote llegue a la fluencia. Es por esto que, para realizar un análisis paramétrico del método estático, se debe tener en cuenta que no solo existe un tipo de falla, sino 2. La falla que se alcance primero será la que limite el diseño por el método.

### 7.2.1. Falla del pilote por fluencia – Método de Broms

La falla del pilote por fluencia está determinada por el momento de fluencia, el diámetro y dos parámetros del suelo; el coeficiente de fricción y el peso específico.

Se aprecia en el gráfico de la Figura 7.3 la relación que existe entre las propiedades del suelo y del pilote con respecto a la carga última, se consideró una excentricidad igual a cero, lo que significa que el pilote esta al ras de la superficie.

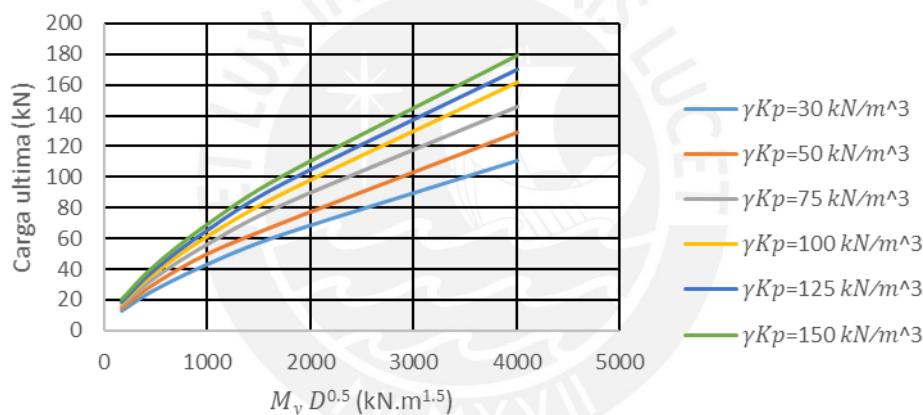


Figura 7.3: Carga última del pilote en función de diferentes parámetros – Método de Broms

Si la excentricidad aumentase el valor de la carga última se reduciría ya que el acero asumiría mayor parte del momento por lo que llegará a la fluencia frente a una carga menor. Si el pilote se encontrase debajo del nivel del suelo el valor de la carga última aumentaría ya que mientras más profundo el estrato mayor será la resistencia al corte del suelo.

Esto es solo el análisis por falla del pilote, sin embargo, existe la posibilidad de que se presente una falla en el suelo; esto sucede en el caso de que el suelo presente características de resistencia muy pobres, valores de  $N$  bajos.

Se realiza una comparación entre la carga última para un pilote flexible y carga última por falla del suelo, el menor valor es el primero en suceder y por lo tanto domina el diseño.

### 7.2.2. Falla del pilote – Método de Meyerhoff

La falla del pilote para el método de Meyerhoff reduce la longitud del pilote y utiliza una longitud efectiva que depende del valor  $k_{rs}$ .

$$L_e = 1.65 L k_{rs}^{0.12} \quad (7.2)$$

Si el valor de la longitud efectiva es igual o mayor a la longitud significa que el pilote se comporta rígidamente, entonces dependiendo del valor de  $k_{rs}$  existe una longitud a partir de la cual el pilote tendrá un comportamiento flexible.

$$L_r = \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{0.0154 E_s}} \quad (7.3)$$

Si la longitud es mayor a  $L_r$  el pilote se comportará flexiblemente mientras de ser menor podemos esperar un comportamiento rígido.

Se define el valor de  $P_m = \frac{E_p I_p}{E_s}$ , este valor es inverso al módulo de elasticidad del suelo por lo que valores más altos reflejan una calidad de suelo más bajo para una misma sección.

Un pilote que pueda mantener un comportamiento rígido tendrá entonces una resistencia última mayor. El valor de la longitud efectiva está relacionado directamente con el valor de carga última mediante la siguiente ecuación.

$$H_u = 0.12 \gamma B L_e^2 K_p \quad (7.4)$$

Una ecuación que permite ver más claramente el valor de la longitud efectiva en función de la longitud y de  $P_m$  es:

$$L_e = 1.65 L^{0.52} P_m^{0.12} \quad (7.5)$$

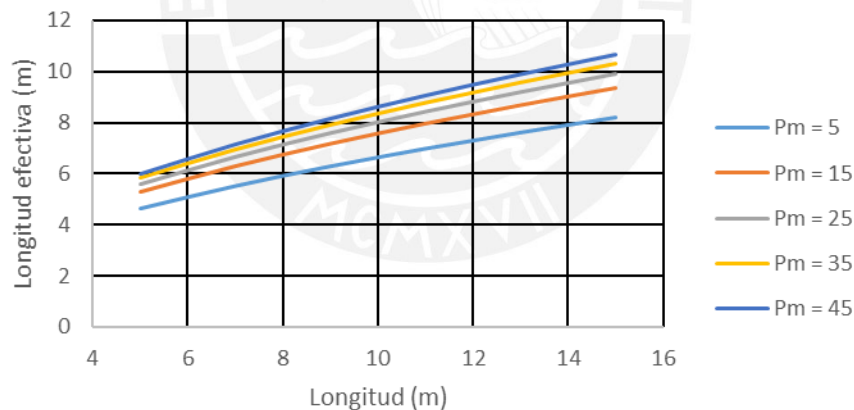


Figura 7.4: Relación entre carga ultima,  $P_m$  y longitud – Método de Meyerhoff

En la Figura 7.4 Se aprecia que para cierto valor de  $P_m$ , para cierto incremento de longitud, existirá un menor incremento de longitud efectiva, llegando a un punto en el cual la longitud efectiva represente un valor del x% de la longitud, este punto será llamado  $L_x$ . Para Meyerhoff una longitud efectiva de 90% L, significa básicamente que el 10% del pilote no trabaja; esta tabla ayuda entonces a poder conocer la eficiencia del pilote. Esto último se puede apreciar en la Figura 7.5.

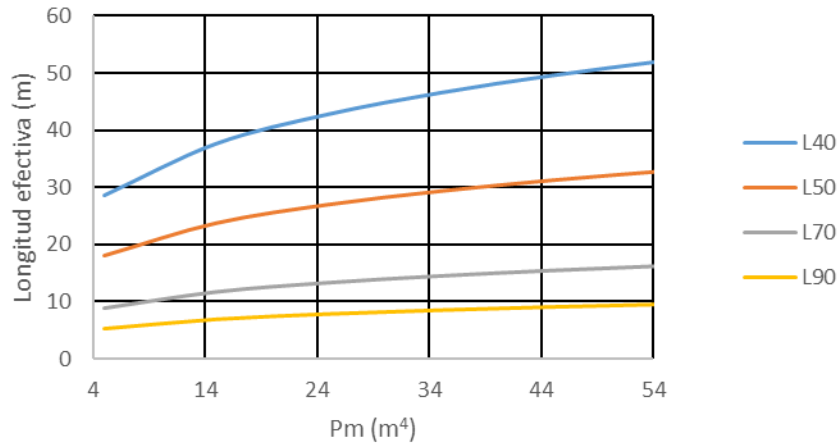


Figura 7.5: Relación entre carga ultima, Pm y eficiencia del pilote – Método de Meyerhoff

### 7.2.3. Falla del suelo

La falla del suelo en el método pseudo estático se da cuando el pilote tiene un comportamiento rígido. El comportamiento rígido se da cuando el pilote se comporta sin deformarse, esto depende no solo del material y geometría del pilote sino también de la resistencia del suelo. Una resistencia del suelo elevada hará que el fondo del pilote se comporte como si estuviese empotrado, dándole un comportamiento flexible.

Los cuatro métodos descritos en el marco teórico, fueron calculados para diferentes valores longitud como se muestra en la Figura 7.6, Figura 7.7, Figura 7.8.

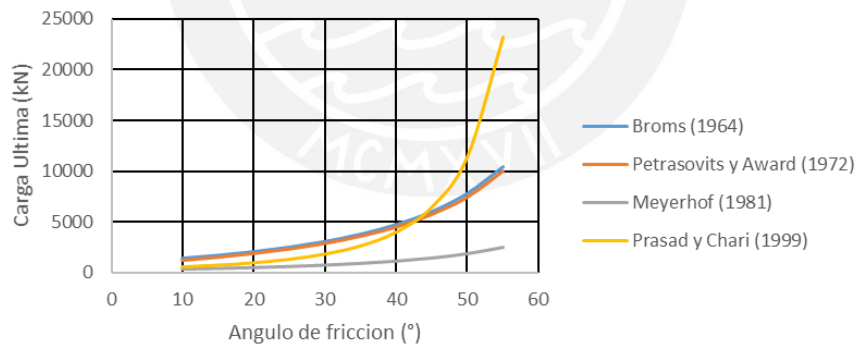


Figura 7.6: Relación entre carga última y Ángulo de fricción

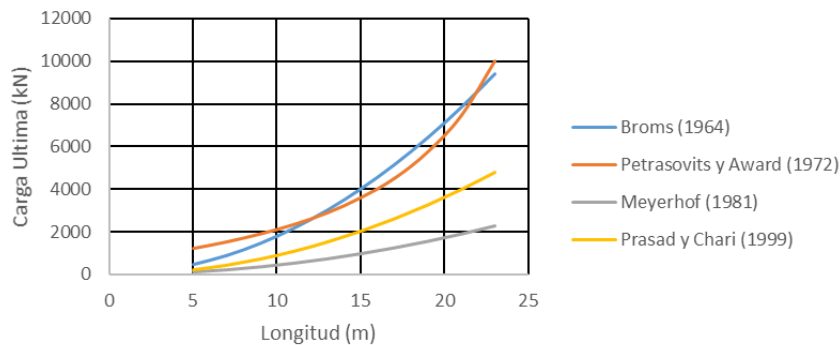


Figura 7.7: Relación entre carga última y Longitud

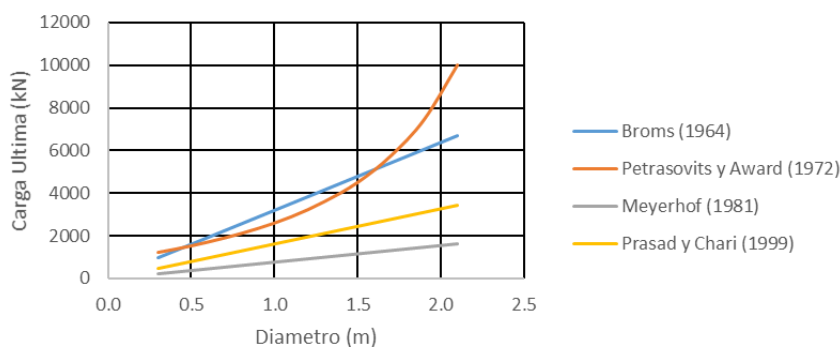


Figura 7.8: Relación entre carga última y Diámetro

Estas graficas muestran que el método menos conservador es el Broms y aunque para valores pequeños de coeficiente de fricción el método de Prasad es el más conservador, mientras más elevamos el mismo, este logra superar al método de Meyerhoff.

### 7.3. Análisis mediante el modelo numérico

El “Sim\_X\_i” hace referencia al parámetro modificada y al porcentaje de variación. Dónde: X = Propiedad (i = 1, 2, 3 o 4), 1 = incremento del 20% en el valor del parámetro, 2 = Incremento del 10% en el valor del parámetro, 3 = Decremento del 10% en el valor del parámetro, 4 = Decremento del 20% en el valor del parámetro.

#### 7.3.1. Influencia del diámetro del terreno en el modelo

Se realizó el análisis considerando las mismas propiedades que en el capítulo 5, con la diferencia del diámetro del terreno en el cual se encontró el pilote, el cual varía en porcentaje respecto al diámetro original, se puede observar que no existe relevancia significativa en las respectivas respuestas en la Tabla 7.4

Tabla 7.4: Diámetro del terreno vs desplazamiento

ID	Diámetro del terreno (m)	Carga (kN)	Desplazamiento (mm)	Variación (%)
Sim0 base	5.0	294.3	30.98	-
Sim_Dt_1	6.0	294.3	30.92	-0.2
Sim_Dt_2	5.5	294.3	30.96	-0.1
Sim_Dt_3	4.5	294.3	31.00	0.1
Sim_Dt_4	4.0	294.3	31.04	0.2

#### 7.3.2. Influencia del módulo de elasticidad del acero

Se realizó el análisis considerando exactamente las mismas propiedades que en el capítulo 5, con la diferencia del módulo de elasticidad, el cual varía en porcentaje respecto al módulo de elasticidad del acero original. Se puede observar la influencia en la Tabla 7.5



Tabla 7.5: Módulo de elasticidad del acero vs desplazamiento

ID	Módulo de elasticidad (MPa)	Carga (kN)	Desplazamiento (mm)	Variación (%)
Sim0 base	2.0E6	294.3	30.98	-
Sim_E_1	2.4E6	294.3	28.42	-8.3
Sim_E_2	2.2E6	294.3	29.61	-4.4
Sim_E_3	1.8E6	294.3	32.71	5.6
Sim_E_4	1.6E6	294.3	34.77	12.2

### 7.3.3. Influencia del módulo de elasticidad del suelo

Se realizó el análisis considerando exactamente las mismas propiedades que en el capítulo, con la diferencia del módulo de elasticidad, el cual varía en porcentaje respecto al módulo de elasticidad del suelo original, tal como muestra en la Tabla 7.6. Módulo de elasticidad del suelo base por estrato: 18.87 / 35.75 / 78.14 MPa.

Tabla 7.6: Módulo de elasticidad del suelo vs desplazamiento

ID	Módulo de elasticidad (MPa)	Carga (kN)	Desplazamiento (mm)	Variación (%)
Sim0 base	1.00E <sub>s</sub>	294.3	30.98	-
Sim_Es_1	1.20 E <sub>s</sub>	294.3	28.26	-8.8
Sim_Es_2	1.10 E <sub>s</sub>	294.3	29.51	-4.7
Sim_Es_3	0.90 E <sub>s</sub>	294.3	32.68	5.5
Sim_Es_4	0.80 E <sub>s</sub>	294.3	34.75	12.2

### 7.3.4. Influencia del ángulo de fricción

Se realizó el análisis considerando exactamente las mismas propiedades que en el capítulo, con la diferencia del ángulo de fricción, el cual varía en porcentaje respecto al original, tal como se observa en la Tabla 7.7. Ángulo de fricción del suelo base por estrato: 40.99 / 39.61 / 38.43 °.

Tabla 7.7 Angulo de fricción vs desplazamiento

ID	Ángulo de fricción (°)	Carga (kN)	Desplazamiento (mm)	Variación (%)
Sim0 base	1.00 φ	294.3	30.98	-
Sim_φ_1	1.20 φ	294.3	26.49	-14.5
Sim_φ_2	1.10 φ	294.3	28.59	-7.7
Sim_φ_3	0.90 φ	294.3	34.89	12.6
Sim_φ_4	0.80 φ	294.3	41.98	35.5

### 7.3.5. Influencia de la dilatación

Se realizó el análisis considerando exactamente las mismas propiedades que en el capítulo, con

la diferencia de la dilatación, la cual varía respecto a la original, tal como se ve en la Tabla 7.8 Ángulo de dilatación del suelo base por estrato: 25.99 / 24.61 / 23.43 °.

Tabla 7.8: Dilatación vs desplazamiento

ID	Dilatación (°)	Carga (kN)	Desplazamiento (mm)	Variación (%)
Sim0 base	1.00 $\psi$	294.3	30.98	-
Sim_ψ_1	1.20 $\psi$	294.3	30.16	-2.6
Sim_ψ_2	1.10 $\psi$	294.3	30.58	-1.3
Sim_ψ_3	0.90 $\psi$	294.3	31.38	1.3
Sim_ψ_4	0.80 $\psi$	294.3	31.80	2.6

### 7.3.6. Influencia del peso específico

Se realizó el análisis considerando exactamente las mismas propiedades que en el capítulo, con la diferencia del peso específico, respecto al original, tal como se observa en la Tabla 7.9. Peso específico del suelo base por estrato: 17.17 / 17.17 / 17.66 kN.

Tabla 7.9: Peso específico vs desplazamiento

ID	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Carga (kN)	Desplazamiento (mm)	Variación (%)
Sim0 (base)	1.00 $\gamma$	294.3	30.98	-
Sim_γ_1	1.20 $\gamma$	294.3	29.17	-5.8
Sim_γ_2	1.10 $\gamma$	294.3	30.01	-3.1
Sim_γ_3	0.90 $\gamma$	294.3	32.75	5.7
Sim_γ_4	0.80 $\gamma$	294.3	35.00	13.0

### 7.3.7. Influencia del módulo de poisson

Se realizó el análisis considerando exactamente las mismas propiedades que en el capítulo 5, con la diferencia del módulo de poisson, el cual varía con respecto al original, tal como se observa en la Tabla 7.10. Módulo de Poisson del suelo base por estrato: 0.29 / 0.30 / 0.29

Tabla 7.10: Módulo de Poisson vs desplazamiento

ID	Módulo de Poisson (v)	Carga (kN)	Desplazamiento (mm)	Variación (%)
Sim0 Base	1.00 v	294.3	30.98	-
Sim_v_1	1.20 v	294.3	30.48	-1.6
Sim_v_2	1.10 v	294.3	30.74	-0.8
Sim_v_3	0.90 v	294.3	31.21	0.7
Sim_v_4	0.80 v	294.3	31.45	1.5

## 8. Discusión de los resultados

### 8.1. Comparación de los tres métodos de análisis

Los métodos pseudoestáticos son probablemente los métodos más conservadores, debido a que disminuyen la resistencia del suelo y consideran que el acero falla cuando este llega a fluencia; sin embargo, debido a los valores de resistencia elevados que presenta el suelo, estos métodos quedan bastante alejados de la respuesta real.

El método  $p$ - $y$  da como resultado una magnitud de desplazamiento lateral similar, sin embargo, el momento hallado está muy por debajo del momento de fluencia, lo cual no es compatible con el ensayo, puesto que en el mismo se aprecia una deformación permanente y por lo tanto incursiona en el rango inelástico. Esto se debe a que reducir todos los parámetros del suelo a uno solo como el módulo de reacción ( $k_h$ ), representa un valor de incertidumbre alto, lo que conlleva a que los cálculos para el método  $p$ - $y$ , dispongan de factores de seguridad más elevados para que se pueda realizar un diseño adecuado.

El modelo numérico tiene un resultado de desplazamiento muy similar al del ensayo, debido a las condiciones del mismo, un adecuado enmallado, un adecuado diámetro de terreno elegido en el modelo, una correcta caracterización verificada por dos ensayos distintos, además de una simulación correcta del estado de esfuerzos iniciales del terreno.

El ensayo de carga lateral da como resultado la magnitud que se desplaza el pilote, según la carga que se le aplique progresivamente. Entonces, es por esto que se comparan los resultados teóricos, en conjunto con el modelo de elementos finitos en Abaqus y de esta manera se obtiene lo que se esperaba; los resultados obtenidos bajo los distintos métodos dan como respuesta valores dentro de un rango de magnitud adecuado, por lo que se puede diseñar este tipo de elementos estructurales bajo carga horizontal, utilizando los métodos descritos en la tesis, sin embargo, como se ha observado, los métodos numéricos son más acertados y por lo tanto más confiables.

A continuación, se muestra la Figura 8.1 que es un gráfico que compara los tres principales resultados de cada método en específico los desplazamientos en función de la carga, como lo son el desplazamiento último y la carga máxima aplicada; estos valores se ubican en la zona plástica y por lo tanto en la falla del pilote.

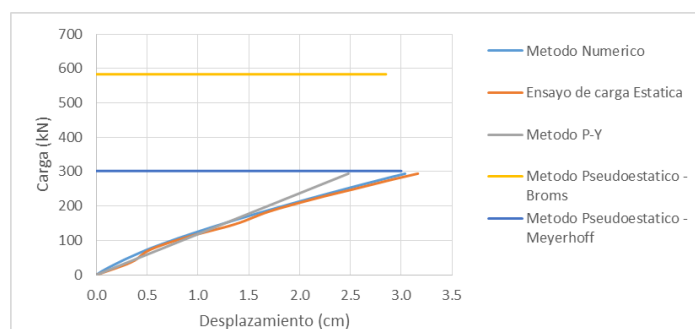


Figura 8.1: Comparación: Carga vs Desplazamiento

## **8.2. Recomendaciones**

### **8.2.1. Método pseudoestático**

Este método al ser fácilmente aplicable, solo necesita de la geometría y de algunas propiedades del suelo, debería servir para el pre dimensionamiento.

El método permite modificaciones, que pueden ser realizadas dependiendo de las condiciones en las que se encuentra el suelo, por lo que se podrían reformular algunas ecuaciones, si es que en campo las condiciones difieren.

Cuando se aplica el método de Broms y se encuentran relaciones de L/D mayores a 7, o momentos de fluencia muy bajos, en el rango de 600 kN.m, es recomendable siempre verificar la ecuación que da el método para pilotes largos. Este fue el caso de estudio donde la relación L/D era mucho mayor a 7.

Se recomienda también que para obtener valores menos conservadores se puede trabajar en la ecuación de pilote largo con el momento nominal y no con el momento de fluencia, esto aumentará el valor de la carga última horizontal.

### **8.2.2. Método p-y**

Al existir un registro bibliográfico tan amplio de diferentes ensayos de carga se puede dar a conocer la deformada del pilote para el suelo que necesite ser analizado. De esta manera se puede estimar el valor del módulo de reacción horizontal ( $k_h$ ), para que el análisis sea más preciso.

Alrededor del mundo existen diferentes guías y normas que sirven como apoyo para realizar los cálculos del modelo, teniendo en cuenta las curvas p-y que provee la bibliografía. Esto permitiría conocer un referente del comportamiento del pilote a estudiar.

Se recomienda entender las características del suelo, al momento de elegir el módulo de reacción horizontal ( $k_h$ ) ya que cada autor trabaja con un suelo de propiedades determinadas. Para efectos de la tesis se decidió las relaciones  $k_h$  y  $n_h$  aplicadas son las de Matlock & Reese debido a que el ensayo se realizó en un suelo arenoso medianamente denso.

Se recomienda que la relación L/D sea menor a 15, ya que al seguir aumentando esta relación para un pilote de acero hueco de espesor  $\frac{1}{2}$ ”, no mejora demasiado la respuesta. Esto se puede observar en el análisis paramétrico del modelo numérico al variar la longitud, en el Capítulo 7.

### **8.2.3. Modelo numérico**

Se recomienda que las condiciones de contorno se encuentren alejadas tanto de las caras laterales como de la cara inferior. Una distancia recomendable es diez veces el diámetro, ya que, a esta distancia, la energía que se genera por la fuerza, se ha disipado totalmente, por lo que se puede considerar que en estos puntos ya no existen desplazamientos ni giros. El análisis paramétrico muestra además que esta asunción es cierta, ya que, al modificar el diámetro del terreno entre valores que oscilan 9 y 12 veces el diámetro del pilote, no existe variación de la respuesta.

Es recomendable si es que se tiene mayores estudios del comportamiento del suelo no se trabaje con el modelo constitutivo plástico de Mohr Coulomb sino más bien con un modelo más sofisticado puesto que estos son más precisos.

La discretización tiene que seguir un criterio de eficiencia tal que, sea lo suficientemente fina como para obtener resultados adecuados, pero no demasiado, debido a que esto podría conllevar a que el modelo no converja.

#### **8.2.4. Prueba de carga lateral**

En el ensayo de carga lateral se deben tener en cuenta los desplazamientos relativos que se generan, si es que el mecanismo de conexión, es decir el pistón, no está bien soldado, ya que tiene que cumplir el papel de ser un solo elemento rígido, de otra forma presentaría lecturas inexactas.

El ensayo de carga lateral también depende mucho de qué mecanismo de reacción se utiliza, ya que para efectos de la tesis se realiza la prueba de carga lateral sin tomar en cuenta el área a trabajar porque ésta era muy amplia y se realizó dicho ensayo con fines experimentales. Sin embargo, si se va a realizar en algún proyecto, se tiene que tener en cuenta el área a ensayar, ya que se necesitan hincar pilotes de reacción y colocar una masa que soporte toda la carga lateral sin deformarse.

Se recomienda seguir específicamente los lineamientos del *American Society for Testing and Materials* (ASTM), debido a que es uno de los métodos estandarizados más utilizados en el mundo. Para efectos de esta tesis se utilizó este método gracias a que se disponía de la instrumentación especificada en la ASTM-3966.

Es recomendable colocar un dial de deformación en el mecanismo de conexión para corregir, de ser el caso, el desplazamiento relativo por alguna falla en la soldadura o deformación en el mecanismo de reacción.

Es muy importante primero delimitar el área de realización del ensayo de carga lateral, para trabajar de manera ordenada y rápida, de lo contrario el ensayo podría distorsionarse, ya que existe una longitud mínima de separación entre el pilote ensayado y los de reacción.

Se recomienda realizar el ensayo teniendo en cuenta dos factores, el primero es el factor estratigráfico ya que, si no es posible contar con puntos de apoyo debido al terreno, el ensayo no será posible. El segundo factor es el costo del ensayo versus el presupuesto de la obra, si solo se realizaran dos pilotes, sería excesivo realizar la prueba, mientras que de ser una mega construcción donde se contaran con más de 100 pilotes, el coste de un ensayo representaría un valor ínfimo del costo total.

El costo de un pilote ensayado es aproximadamente 2.5 veces más que el costo del hincado de un solo pilote. (PSV, 2018). Se muestra en la Tabla 8.1 el porcentaje del costo en relación con los pilotes hincados.

Tabla 8.1: Influencia del costo del ensayo respecto al costo del hincado

<b>Numero de pilotes a hincar para el proyecto</b>	<b>Porcentaje del costo del ensayo respecto al costo del hincado</b>
1	250%
10	25%
25	10%
50	5%
100	2.5%



## 9. Conclusiones

Estas son las siguientes conclusiones:

- Comparando las respuestas de los tres métodos se concluye que el más acertado es el método de elementos finitos, donde el suelo tiene el modelo constitutivo de Mohr Coulomb, que tiene un margen de diferencia mínimo (2%).
- Se comprueba la teoría del método  $p$ - $y$  que predice que para cargas horizontales el pilote no solo se desplaza en una dirección, sino que a una profundidad específica existe un desplazamiento en el otro sentido, tal como se muestra en la Figura 2.7 a). Esto también se observa en la deformada resultante del MEF. De la misma manera se observa que durante el ensayo hay desplazamientos en dirección opuesta, como se muestra en las Figuras 4.21 y 4.22.
- En el diseño realizado existen dos posibles tipos de falla; la falla por flexión en el pilote y la falla del suelo. Es por esto que realizando el análisis paramétrico se ve que mientras se incrementan algunas propiedades, no necesariamente se incrementan las resistencias, por lo que aumentar las dimensiones no siempre es una solución adecuada, tal como se muestra en las Figuras 5.1 y 5.2 donde se puede apreciar que al aumentar la longitud del pilote, los desplazamientos máximos y momentos máximos no se incrementan a partir de los 7.5 m de longitud.
- Se concluye que el método pseudoestático-Broms es el menos adecuado para el análisis, debido a que toma en cuenta la rigidez infinita del pilote, en un solo estrato de diseño, no considera la estratigrafía del análisis. Es por esto que se recomienda utilizar este método a manera de predimensionamiento, además se debe cumplir que las propiedades de los estratos no sean muy diversas a lo largo del pilote.
- Los resultados del ensayo muestran una breve incursión en la zona plástica lo que significa que el pilote ha superado el esfuerzo admisible, considerando que la resistencia en compresión según el ensayo PDA resulta 224.5 t, podría aseverarse que la resistencia lateral ronda el 10% de la vertical.

## 10. Bibliografía

Alonso, U. R.

1986 *Recomendação para Realização de Provas de Carga Horizontal em Estavas de Concreto Armado*. VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Porto Alegre. P. 261-276.

Alonso, U. R.

1998 *Prova de Carga Horizontal em Estaca Hélice Contínua*. *Solos e Rochas*. São Paulo. nº 21. P. 51-57.

ASTM A572 / A572M-07

2007 *Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel*. ASTM International. West Conshohocken. PA.

Ashour, M., Pilling, P., & Norris, G.

2004 *Lateral behavior of pile groups in layered soils*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 130(6). 580-592.

Ayala, Luis

2016 *Litología y granulometría de los depósitos sedimentarios*. *Explorock*. Obtenido de: <https://www.explorock.com/litologia-y-granulometria-de-los-depositos-sedimentarios/>

Bathe, K. J.

2007. *Finite element method*. Wiley encyclopedia of computer science and engineering. 1-12.

Bowles, J. E.

1996 *Foundation Analysis & Design*. 5th Edition. McGraw-Hill Companies.

Broms, B. B.

1964 *Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils*. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*. ASCE 91. SM-2. p.27-63.

Broms, B. B.

1964 *Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils*. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*. ASCE 90. SM-3. p.123-156.



Cintra, J. C. A.

1981 *Uma Análise de Provas de Carga Lateral em Estacas e Comparação com os Métodos da Teoria de Reação Horizontal do Solo*. Tesis (Maestría) – Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil. 150p.

C.Reese

2001 *Analysis of single piles under lateral loading*. Texas. EE.UU.

Das, B. M

2008 *Advanced Soil Mechanics*. California, EE.UU, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press Taylor & Francis Group.

Das, B. M.

2014 *Advanced Soil Mechanics (4th Ed.)*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press Taylor & Francis Group.

Das, B. M.

2007 *Principles of Foundation Engineering 6th Edition*. Thomson.

Das, B. M.

2011 *Geotechnical Engineering Handbook*. Fort Lauderdale, Florida, USA: J. Ross Publishing.

Dikmen, Ü.

2009. *Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils*. Journal of Geophysics and Engineering, 6(1), 61-72.

Fan, C. C., Long, J. H.

2005 *Assessment of Existing Methods for Predicting Soil Response of the Laterally Loaded Piles in Sand*. Computers and Geotechnics. P. 274-289.

Fleming, W. G. K., Weltman, A. J., Radolph, M. F., Elson, W. K.

1992 *Piling Engineering (2nd Ed.)*. London, UK: Surrey University Press.

Gomes, A.

2013 *Provas de carga estática com carregamento lateral em estacas escavadas hélice contínua e cravadas metálicas em areia*. Tesis (Maestría) – Centro de tecnologia Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil. 5p.

Helwany, S.

2007. *Applied soil mechanics with ABAQUS applications*. John Wiley & Sons.

Jaky, J.

1944 *The coefficient of earth pressure at rest*. J. of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 355-358.

Khodair, Y., & Abdel-Mohti, A.

2014 *Numerical analysis of pile–soil interaction under axial and lateral loads*. International Journal of Concrete Structures and Materials. 8(3). 239-249.

Michael, M. G.

1996 *Execução e Análise de Provas de Carga Horizontal em Estacas em Solo Colapsível*. Tesis (Maestría) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, Brasil. 168p.

Ortiz, E.

1994 *Estudio agrológico semi-detallado del valle de Chilca: Geología General*. Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). Lima, Perú.

Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H.

1974 *Foundation engineering (Vol. 10)*. New York: Wiley.

Pise, P. J.

1984 *Lateral response of free-head pile*. Journal of Geotechnical Engineering. 110(12). 1805-1809.

Poulos, H. G.

1971 *Behaviour of Laterally Loaded Piles: I – single Piles*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering Division. ASCE 97(5). p.711-731.

Poulos, H. G., & Davis, E. H.

1980 *Pile foundation analysis and design* (No. Monograph).

Prakash, S., & Sharma, H. D.

1990 *Pile foundations in engineering practice*. John Wiley & Sons.

Rajapakse, R.

2008 *Pile Design and Construction Rules of Thumb*. New York, USA. Butterworth-Heinemann and Elsevier.

Redacción El Comercio

2018 9 de Enero. *¿De qué megaproyectos depende la economía peruana en 2018?* El Comercio. Obtenido de: <https://elcomercio.pe/economia/dia-1/megaproyectos-depende-economia-peruana-2018-noticia-487379>

Redacción Gestión

2017 11 de Febrero. *¿Cuánto tiempo le tomaría al Perú cerrar la brecha de infraestructura estimada en US\$ 69,000 millones?* Gestión. Obtenido de: <https://gestion.pe/economia/le-tomaria-peru-cerrar-brecha-infraestructura-estimada-us-69-000-millones-128485>

Rollins K., Peterson K. y Weaver T.

1998 *Lateral Load Behavior of Full-Scale Pile Group in Clay*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 6. pp. 468 - 478.

Salazar, H., León, W., Rossel, W., Torres, V.

2002 *Mapa geológico del cuadrángulo de Mala 26J-1*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Lima, Perú.

Sales, M. M., Cunha, R. P., Farias, M. M.

1998 *O Uso do Método das Direções Finitas na Análise de Estacas Carregadas Lateralmente*. Congresso Brasileiro de Mecânica do Solo e Engenharia Geotécnica. XI COBRAMSEG. Brasília, Brasil. p.245.

SENCICO

2016 *Instalación del laboratorio de estructuras – Sencico*. Distrito de Santa María del mar. Lima, Perú. p. 7-10.

Sepúlveda Ospina, B

2013 *Evaluación del comportamiento de pilotes de gran diámetro ante cargas laterales inducidas por deslizamientos*. Bogotá. Colombia.

Sousa, C. T.

2006 *Ensaio e Análise de Resposta de Estacas em Solo Residual do Granito Sob Ações Horizontais*.

*Tesis (Maestría)* – Faculdade de Engenharia do Porto, Portugal. 266p.

Terzaghi, K.

1955 *Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction. Géotechnique*. The Institution of Civil Engineers. Londres, v.5, nº 4, p. 297-326.

Tomlinson, M., & Woodward, J.

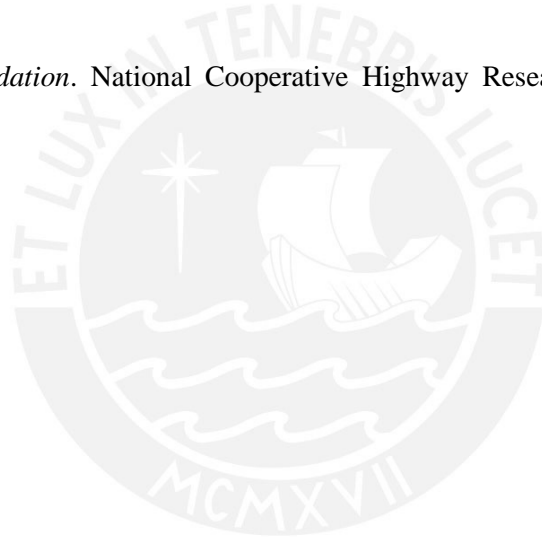
2014 *Pile design and construction practice*. CRC Press.

Velloso, D. A., Lopes, F. R.

2010 *Fundações: Critérios de Projeto, Investigação do Subsolo, Fundações Superficiais, Fundações Profundas*. São Paulo, Brasil. Oficina de Textos.

Vesic, A.S

1977 *Design of pile foundation*. National Cooperative Highway Research Program Synthesis 42. EE.UU.



# **ANEXO 1**

**RESULTADOS SPT**

# PERFIL DEL SUELO

Solicitante : PSV CONSTRUCTORES SAC  
 Proyecto : PERFORACION CON FINES DE CIMENTACION  
 Ubicacion : CHILCA

P-1

Método de excavación :	DIAMANTINA	Fecha :	28/03/17	Largo
Cotas	Referencia: Nivel del terreno	Fondo :	25.00	Ancho
	Superficie : +/- 0.00 m	Nivel Freático :	NP	Prof: 25.00 m

Prof. m.	SUCS	DESCRIPCION	MUESTRA			N°
			N°	Tipo	Prof. m.	
0.00		<b>Relleno compuesto de:</b> Arena fina suelta con gravas				
0.20						
0.80	SP-SM	Arena fina, ligeramente limosa, mal graduada, medianamente densa, ligeramente humeda, color marrón claro.				
1.00			1	Mab	1.00 1.45	22 35 48
2.00	SP	Arena fina mal graduada, densa, ligeramente humeda, color marrón claro, con presencia de gravas sub angulares aisladas con pequeños lentes de limo arenoso.	2	Mab	2.00 2.45	25 18 11
3.00			3	Mab	3.00 3.45	23 25 50
4.00						

Mab = muestra en bolsa

Mls = muestra en shelby

Pm = penetrómetro manual

Mlb = muestra en bloque

Dn = densidad natural

qu = resistencia a la compresión simple (kg/cm<sup>2</sup>)

N (SPT) = ensayo estándar de penetración (golpes/30 cm)

## PERFIL DEL SUELO

Solicitante : PSV CONSTRUCTORES SAC

Proyecto : PERFORACIÓN CON FINES DE CIMENTACIÓN

Ubicación : CHILCA

P-1

Método de excavación :	DIAMANTINA	Fecha :	28/03/17	Largo	
Cotas	Referencia: Nivel del terreno	Fondo :	25.00	Ancho	
	Superficie : +/- 0.00 m	Nivel Freático :	NP	Prof:	25.00 m

Prof. m.	SUCS	DESCRIPCION	MUESTRA			N°
			N°	Tipo	Prof. m.	
4.00			4	Mab	4.00 4.45	24 34 38
5.00			5	Mab	5.00 5.45	5 17 33
6.00	SP	Arena fina mal graduada, densa, ligeramente húmeda, color marrón claro, con presencia de gravas sub angulares aisladas con pequeños lentes de limo arenoso.	6	Mab	6.00 6.45	28 34 57
7.00			7	Mab	7.00 7.45	22 39 32
8.00						

Mab = muestra en bolsa      Mis = muestra en shelby      Pm = penetrómetro manual  
 Mlb = muestra en bloque      Dn = densidad natural      qu = resistencia a la compresión simple (kg/cm<sup>2</sup>)  
 N (SPT) = ensayo estándar de penetración (golpes/30 cm)

## PERFIL DEL SUELO

Solicitante : PSV CONSTRUCTORES SAC

Proyecto : PERFORACIÓN CON FINES DE CIMENTACIÓN

Ubicación : CHILCA

P-1

Método de excavación :	DIAMANTINA	Fecha :	28/03/17	Largo
Cotas	Referencia: Nivel del terreno	Fondo :	25.00	Ancho
	Superficie : +/- 0.00 m	Nivel Freático :	NP	Prof: 25.00 m

Prof. m.	SUCS	DESCRIPCION	MUESTRA			N°
			N°	Tipo	Prof. m.	
8.00			8			10 35 47
9.00						24 38 43
10.00	SP	Arena fina mal graduada, densa, ligeramente húmeda, color marrón claro, con presencia de gravas sub angulares aisladas con pequeños lentes de limo arenoso.				19 32 39
11.00						21 37 50
12.00						

Mab = muestra en bolsa

MIs = muestra en shelly

Pm = penetrómetro manual

Mlb = muestra en bloque

Dn = densidad natural

qu = resistencia a la compresión simple (kg/cm<sup>2</sup>)

N (SPT) = ensayo estándar de penetración (golpes/30 cm)



## PERFIL DEL SUELO

Solicitante : PSV CONSTRUCTORES SAC

Proyecto : PERFORACIÓN CON FINES DE CIMENTACIÓN

Ubicación : CHILCA

P-1

Método de excavación :	DIAMANTINA	Fecha :	28/03/17	Largo
Cotas	Referencia: Nivel del terreno	Fondo :	25.00	Ancho
	Superficie : +/- 0.00 m	Nivel Freático :	NP	Prof: 25.00 m

Prof. m.	SUCS	DESCRIPCION	MUESTRA			N°		
			N°	Tipo	Prof. m.			
12.00	SP	<p style="font-size: small;">Arena fina mal graduada, densa, ligeramente húmeda, color marrón claro, con presencia de gravas sub angulares aisladas con pequeños lentes de limo arenoso.</p>	12	Mab	12.00	20		
						12.45	45	
							55	
13.00					13	Mab	13.00	22
							13.45	39
							50	
14.00					14	Mab	14.00	50
							14.45	
15.00					15	Mab	15.00	40
							15.45	50
16.00								

Mab = muestra en bolsa

MIs = muestra en shelly

Pm = penetrómetro manual

Mlb = muestra en bloque

Dn = densidad natural

qu = resistencia a la compresión simple (kg/cm<sup>2</sup>)

N (SPT) = ensayo estándar de penetración (golpes/30 cm)

## PERFIL DEL SUELO

Solicitante : PSV CONSTRUCTORES SAC

Proyecto : PERFORACIÓN CON FINES DE CIMENTACIÓN

Ubicación : CHILCA

P-1

Método de excavación : DIAMANTINA

Fecha : 28/03/17

Largo :

Cotas Referencia: Nivel del terreno

Fondo : 25.00

Ancho :

Superficie : +/- 0.00 m

Nivel Freático : NP

Prof: 25.00 m

Prof. m.	SUCS	DESCRIPCION	MUESTRA			N°
			N°	Tipo	Prof. m.	
16.00	SP	Arena fina mal graduada, densa, ligeramente humeda, color marrón claro, con presencia de gravas sub angulares aisladas con pequeños lentes de limo arenoso.	16	Mab	16.00	50
					16.45	54
17.00			17	Mab	17.00	56
				17.45	50	
18.00			18	Mab	18.00	50
					18.45	
18.80						
19.00	GP	Grava arenosa (matriz arena fina), bien graduada, muy densa, ligeramente humeda, color gris claro con particulas sub angulares (tamaño maximo 6cm).				50
20.00						

Mab = muestra en bolsa

Mls = muestra en shelby

Pm = penetrómetro manual

Mlb = muestra en bloque

Dn = densidad natural

qu = resistencia a la compresión simple (kg/cm<sup>2</sup>)

N (SPT) = ensayo estándar de penetración (golpes/30 cm)

## PERFIL DEL SUELO

Solicitante : PSV CONSTRUCTORES SAC

Proyecto : PERFORACIÓN CON FINES DE CIMENTACIÓN

Ubicación : CHILCA

P-1

Método de excavación : DIAMANTINA

Fecha : 28/03/17

Largo

Cotas Referencia: Nivel del terreno

Fondo : 25.00

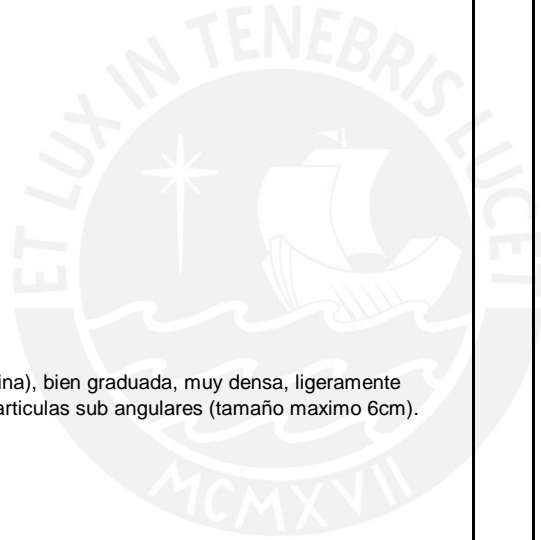
Ancho

Superficie : +/- 0.00 m

Nivel Freático : NP

Prof: 25.00 m

Prof. m.	SUCS	DESCRIPCION	MUESTRA			N°
			N°	Tipo	Prof. m.	
20.00						
21.00						50
22.00	GP	Grava arenosa (matriz arena fina), bien graduada, muy densa, ligeramente humeda, color gris claro con particulas sub angulares (tamaño maximo 6cm).				
23.00						50
24.00						



Mab = muestra en bolsa      Mis = muestra en shelby      Pm = penetrómetro manual  
 Mlb = muestra en bloque      Dn = densidad natural      qu = resistencia a la compresión simple (kg/cm<sup>2</sup>)  
 N (SPT) = ensayo estándar de penetración (golpes/30 cm)

## PERFIL DEL SUELO

Solicitante : PSV CONSTRUCTORES SAC

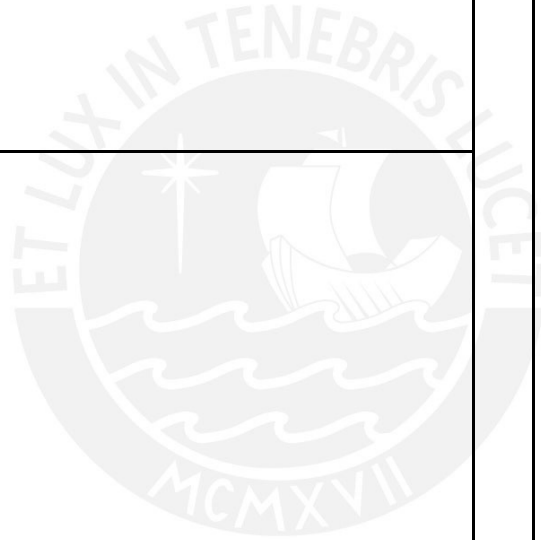
Proyecto : PERFORACIÓN CON FINES DE CIMENTACIÓN

Ubicación : CHILCA

P-1

Método de excavación :	DIAMANTINA	Fecha :	28/03/17	Largo :	
Cotas	Referencia: Nivel del terreno	Fondo :	25.00	Ancho :	
	Superficie : +/- 0.00 m	Nivel Freático :	NP	Prof:	25.00 m

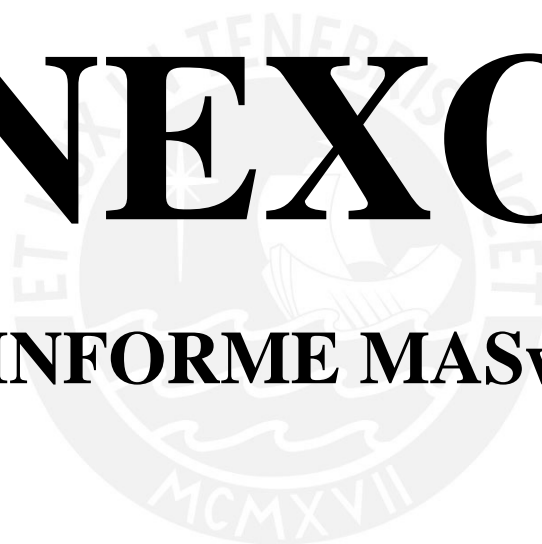
Prof. m.	SUCS	DESCRIPCION	MUESTRA			N°
			N°	Tipo	Prof. m.	
- 24.00	GP	Grava arenosa (matriz arena fina), bien graduada, muy densa, ligeramente húmeda, color gris claro con partículas sub angulares (tamaño máximo 6cm).				50
25.00						



Mab = muestra en bolsa      Mis = muestra en shelby      Pm = penetrómetro manual  
 Mlb = muestra en bloque      Dn = densidad natural      qu = resistencia a la compresión simple (kg/cm<sup>2</sup>)  
 N (SPT) = ensayo estándar de penetración (golpes/30 cm)

# **ANEXO 2**

**INFORME MASw**



**Proyecto:**

**ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA OBTENCIÓN DE  
LOS PARÁMETROS ELÁSTICOS EN EL  
ALMACÉN DE PSV CHILCA**

**Código del Proyecto:**  
**P015-181 PSV CHILCA  
(2017)**

**Revisión: A**

**Fecha:**  
**Abril 2018**

**Especialidad:**  
**Geofísica**

**Descripción:**

**INFORME GEOFÍSICO**

**Cliente:**



**PSV Constructores S.A.**  
Av. Del Pinar 180 Oficina 1104 , Santiago de Surco  
Lima 33, Perú

Rev.	Fecha	Descripción	Elaborado	Revisado	Aprobado
A	23-04-2018	Emitido para envío al cliente			
			Raúl Acho	Miguel Roncal	Zenón Aguilar

## CONTENIDO

<b>1.0</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1	Generalidades .....	1
1.2	Objetivos del estudio .....	1
1.3	Ubicación del Área de Estudio .....	1
<b>2.0</b>	<b>EXPLORACIÓN GEOFÍSICA .....</b>	<b>1</b>
2.1	Fundamentos del ensayo de refracción sísmica y MASW .....	1
2.1.1	Ensayo de refracción sísmica.....	2
2.1.2	Ensayo MASW.....	3
2.2	Equipo e Instrumentos Empleados .....	5
2.3	Descripción de las Actividades de Campo .....	6
2.4	Resultados e interpretación de resultados .....	7
2.4.1	Refracción sísmica .....	7
2.4.2	Sondajes MASW .....	8
<b>3.0</b>	<b>CONSIDERACIONES SÍSMICAS.....</b>	<b>8</b>
3.1	Clasificación del Sitio (Fuente: 2015 International Building Code) .....	8
3.2	Parámetros Elásticos.....	9
<b>4.0</b>	<b>PARÁMETROS DE DISEÑO SISMORRESISTENTE .....</b>	<b>10</b>
4.1	Determinación del tipo de Perfil de Suelo según la NTE E.030.....	10
4.2	Parámetros de sitio según Norma E.030 "Diseño Sismorresistente" .....	11
4.3	Fuerza horizontal equivalente .....	12
<b>5.0</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>14</b>
<b>6.0</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>15</b>



**Cuadros**

Cuadro 1.1.	Coordenadas Proyectadas de las zonas de Estudio. (WGS 84) .....	1
Cuadro 3.1.	Clasificación del Sitio (Fuente IBC, 2015) .....	9
Cuadro 3.2.1.	Cálculo de Parámetros Elásticos MASW-01 – LS-01 .....	10
Cuadro 4.1.1.	Clasificación de perfiles de suelo según E.030 .....	11
Cuadro 4.1.2.-	Velocidades promedio de ondas de corte .....	11

**Figuras**

Figura 2.1.	Tipos de ondas sísmicas .....	2
Figura 2.2.	Refracción de ondas sísmicas .....	2
Figura 2.3.	Esquema del ensayo de refracción sísmica .....	3
Figura 2.4.	(a) Caso simple de dos estratos con límites planos y paralelos (b) Dromocrónica de la refracción sísmica .....	3
Figura 2.5.	Diagrama de ensayo geofísico MASW .....	4
Figura 2.6.	Proceso de obtención del perfil de velocidad de ondas de corte .....	5
Figura 2.7.	Vista general del tendido del cable refracción y posicionamiento de geófonos .....	6
Figura 2.8.	Generación de la energía sísmica para el ensayo MASW .....	7
Figura 3.1.	Cálculo de $V_{s30}$ .....	8
Figura 4.1.	Espectro de diseño según la norma de diseño sismorresistente E.030, 2016 .....	12
Figura 4.2.	Representación gráfica de los parámetros de la norma E.030, 2016 .....	13

**Anexos**

Anexo 1.0:	Ensayos Geofísicos
Anexo 1.1:	Ensayos Geofísicos – Ensayo de Refracción Sísmica
Anexo 1.2:	Ensayos Geofísicos – Modelo Unidimensional de Ondas de Corte MASW
Anexo 2.0:	Panel Fotográfico
Anexo 2.1:	Panel Fotográfico – Refracción Sísmica
Anexo 2.3:	Panel Fotográfico – MASW

**Planos**

Plano P-01.	Ubicación de Exploraciones
-------------	----------------------------



## 1.0 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Generalidades

La empresa **PSV Constructores S.A.** ha solicitado a la empresa **ZER Geosystem Perú S.A.C.** la ejecución del “Estudio Geofísico para la Obtención de los Parámetros Elásticos en el Almacén de PSV Chilca”.

La evaluación de los estudios de campo consistió en la exploración de la zona de estudio por medio del ensayo de Refracción Sísmica y el método de Análisis de Ondas Superficiales en Arreglo Multicanal (MASW), con los cuales se determinó la potencia de los estratos, mediante la interpretación de las velocidades de las ondas compresionales (Ondas P) y ondas de corte (Ondas S) de los materiales que conforman el terreno. Asimismo, se utilizó la información de los sondajes MASW para clasificar el suelo según su comportamiento dinámico en la cual se estimó las velocidades promedio a 30 m de profundidad ( $V_{s30}$ ) a fin de establecer su clasificación en función de la directriz International Building Code (IBC, 2015).

### 1.2 Objetivos del estudio

Determinar la velocidad de propagación de las ondas compresionales (Ondas P) y ondas de corte (Ondas S) del terreno en el área explorada, mediante los ensayos de refracción sísmica y MASW con la finalidad de conocer indirectamente a distintas profundidades la compacidad del suelo y parámetros elásticos del subsuelo.

### 1.3 Ubicación del Área de Estudio

El área de estudio se encuentra ubicado en el distrito de Chilca, provincia de Cañete y departamento de Lima, precisamente en la zona de almacén de la empresa **PSV Constructores S.A.**, cuyas coordenadas se muestra en el Cuadro 1.1.

**Cuadro 1.1.** Coordenadas Proyectadas de las zonas de Estudio. (WGS 84)

ZONA	ESTE (m)	NORTE (m)
Zona de estudio	312 488	8 616 516

## 2.0 EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

La zona de estudio está entre los 40 metros sobre el nivel del mar, la cuál ha sido explorada mediante el ensayo de refracción sísmica y sondaje MASW, convenientemente distribuido según la disponibilidad de espacio y la seguridad en la zona de estudio.

Los ensayos geofísicos comprendieron la ejecución de una línea de refracción sísmica de 60.0 m y 01 punto MASW, la ubicación de los ensayos se presenta en el *Plano P-01 Ubicación de Exploraciones*. A continuación, se presenta el fundamento teórico de los ensayos de refracción sísmica y MASW.

### 2.1 Fundamentos del ensayo de refracción sísmica y MASW

Cuando se generan las ondas sísmicas, a partir de golpes en el suelo con un martillo, éstas incluyen tanto las ondas sísmicas internas primarias y secundarias, así como las ondas superficiales también llamadas ondas Love y Rayleigh, tal como se muestra en la Figura 2.1.

## TIPOS DE ONDAS SÍSMICAS

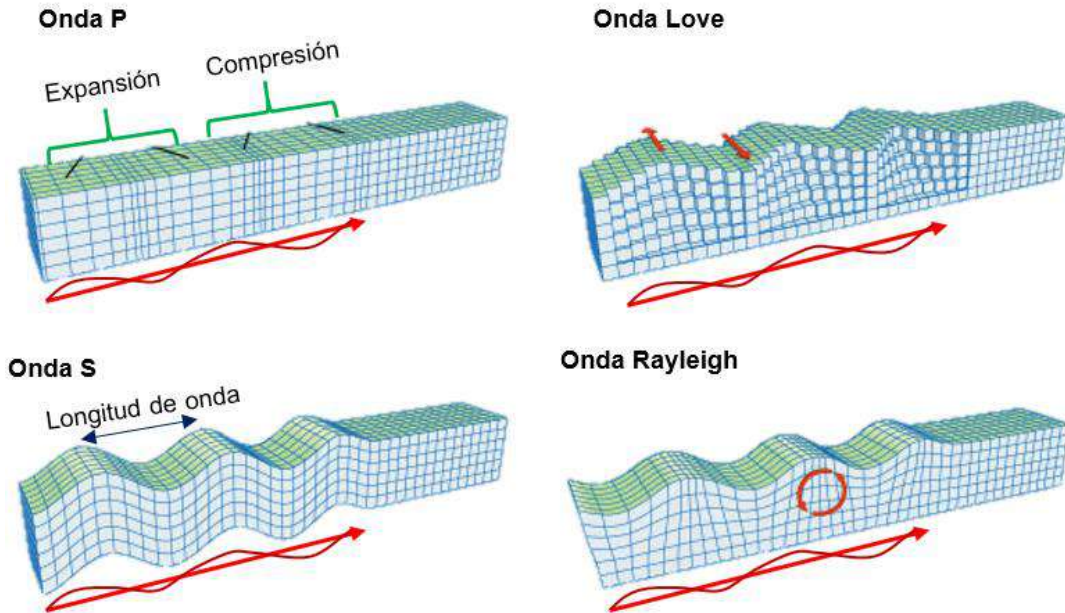


Figura 2.1. Tipos de ondas sísmicas

Los ensayos geofísicos de refracción sísmica y MASW consisten en generar ondas vibratorias a través de un impacto en la superficie del terreno y registrar a distancias variables el arribo de las ondas compresionales (Ondas P) y ondas de corte (Ondas S) respectivamente.

Se presenta a continuación una breve explicación del fundamento teórico de cada uno de los ensayos geofísicos realizados durante los trabajos de campo:

### 2.1.1 Ensayo de refracción sísmica

El ensayo de refracción sísmica es un método de exploración geofísica que permite determinar la estratigrafía del subsuelo en forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades elásticas de los materiales que lo conforman. Este método consiste en la medición de los tiempos de viaje de las ondas compresionales (Ondas P) y algunas veces de las ondas de corte (Ondas S) generadas por una fuente de energía impulsiva a unos puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno, ver Figura 2.2.

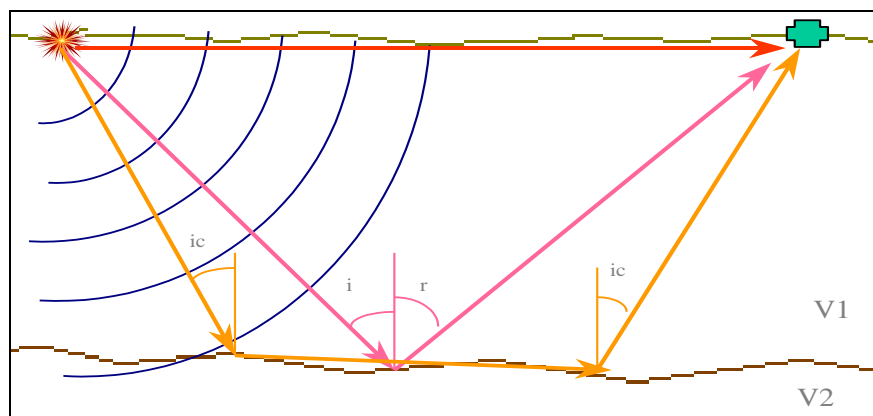


Figura 2.2. Refracción de ondas sísmicas

La energía que se propaga en forma de ondas, es detectada, amplificada y registrada de tal manera que puede determinarse su tiempo de arribo en cada punto. El tiempo cero o inicio de la grabación es generado por un dispositivo de arranque o "trigger" que activa el sistema de adquisición de datos

al momento de producirse el impacto o explosión. La diferencia entre el tiempo de arribo y el tiempo cero permite evaluar el tiempo de propagación de las ondas desde la fuente de energía hasta el lugar en que éstas son registradas. Se muestra un diagrama del ensayo en la Figura 2.3. Esquema del ensayo de refracción sísmica

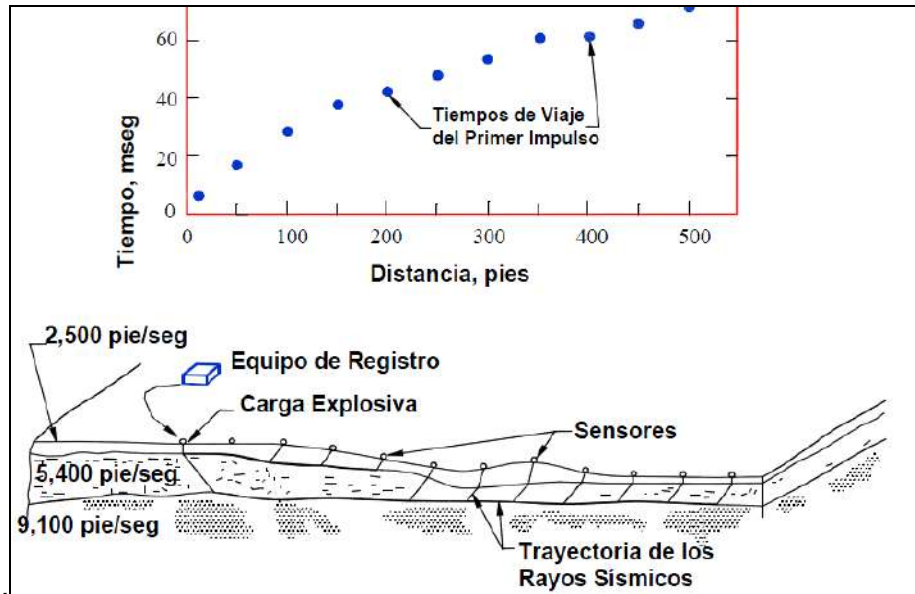


Figura 2.3. Esquema del ensayo de refracción sísmica

Los datos consisten en tiempos de viajes y distancias, siendo el tiempo de viaje el intervalo entre el tiempo cero y el instante en que el detector empieza a responder a la perturbación. Esta información tiempo-distancia (dromocrónica) es procesada para obtener una interpretación en la forma de velocidades de propagación de ondas y la estructura de los estratos del subsuelo, según se observa en la Figura 2.4.

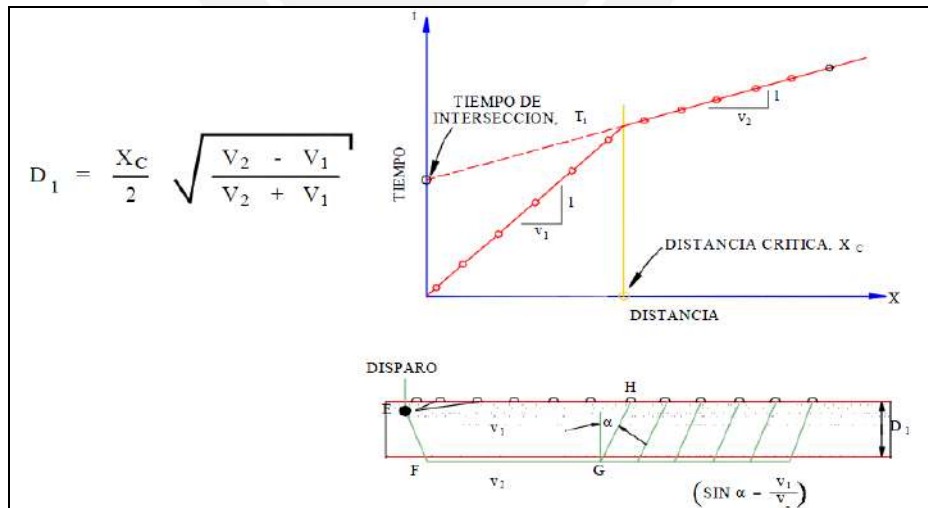
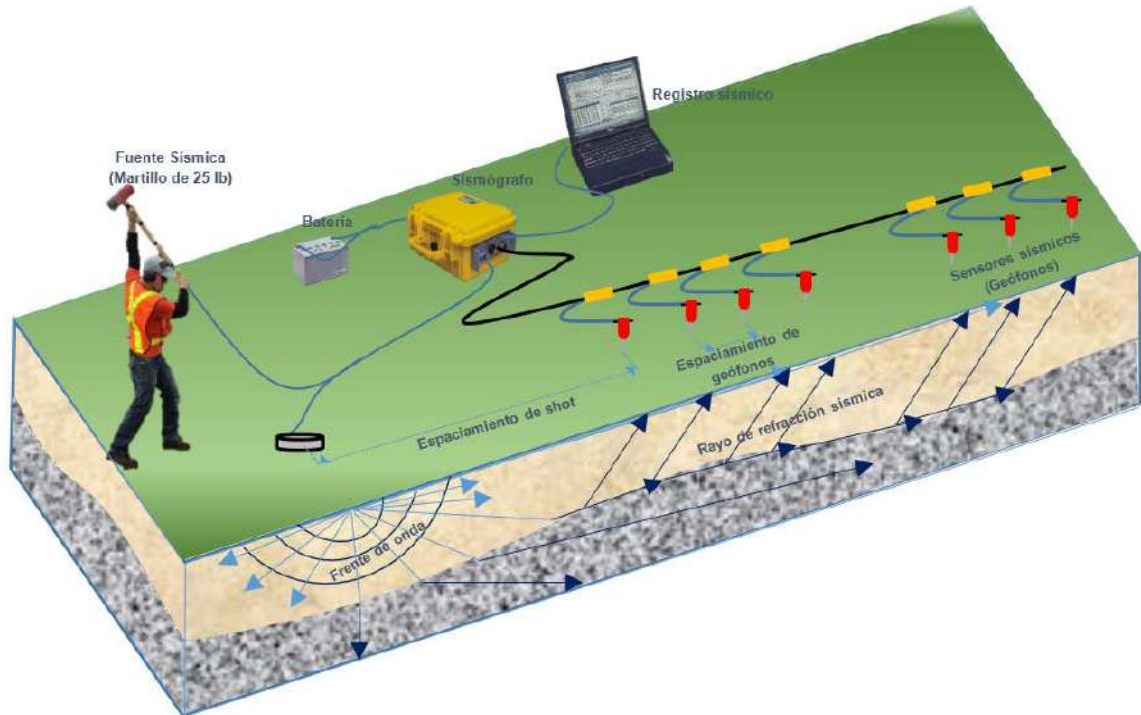


Figura 2.4. (a) Caso simple de dos estratos con límites planos y paralelos (b) Dromocrónica de la refracción sísmica

### 2.1.2 Ensayo MASW

El ensayo MASW (Análisis de Ondas Superficiales en Arreglo Multicanal) es un método que consiste en la interpretación de las ondas superficiales (Ondas Rayleigh) de un registro en arreglo multicanal, generadas por una fuente de energía impulsiva en puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno (ver Figura 2.5.), obteniéndose el perfil

unidimensional de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) para el punto central de dicha línea. El método MASW permite obtener perfiles de ondas S hasta profundidades promedio de 30.0 m.



**Figura 2.5. Diagrama de ensayo geofísico MASW**

Empleando la transformada de Fourier los registros sísmicos son llevados al dominio de las frecuencias, obteniéndose una curva de dispersión medida, que muestra la velocidad de fase ( $c$ ) versus la frecuencia ( $f$ ). Posteriormente se realiza un proceso iterativo, el cual inicia con un primer ajuste de la curva de dispersión teórica a la curva de dispersión real medida en campo, empleando para ello la raíz del error medio cuadrático (RMS), como indicador de la proximidad entre las 2 curvas (teórica y medida). Finalmente, a partir de la curva de dispersión, el perfil de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) del terreno es construido empleando una simple transformación. El procedimiento descrito se encuentra esquematizado en la Figura 2.6.

Mediante esta transformación la longitud de onda ( $\lambda$ ) se calcula a partir de la frecuencia ( $f$ ) y la velocidad de fase ( $c$ ), sustentado en la Ecuación 1.

$$\lambda = c/f \quad \text{Ecuación 1}$$

La profundidad ( $D$ ) se define como 1/3 del valor de la longitud de onda, y la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) a dicha profundidad es  $b$  veces la velocidad de fase medida ( $c$ ), donde  $b$  es un coeficiente que depende de la frecuencia y se basa en un semiespacio homogéneo.

$$D = \lambda/3 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$V_s = b \times c \quad \text{Ecuación 3}$$

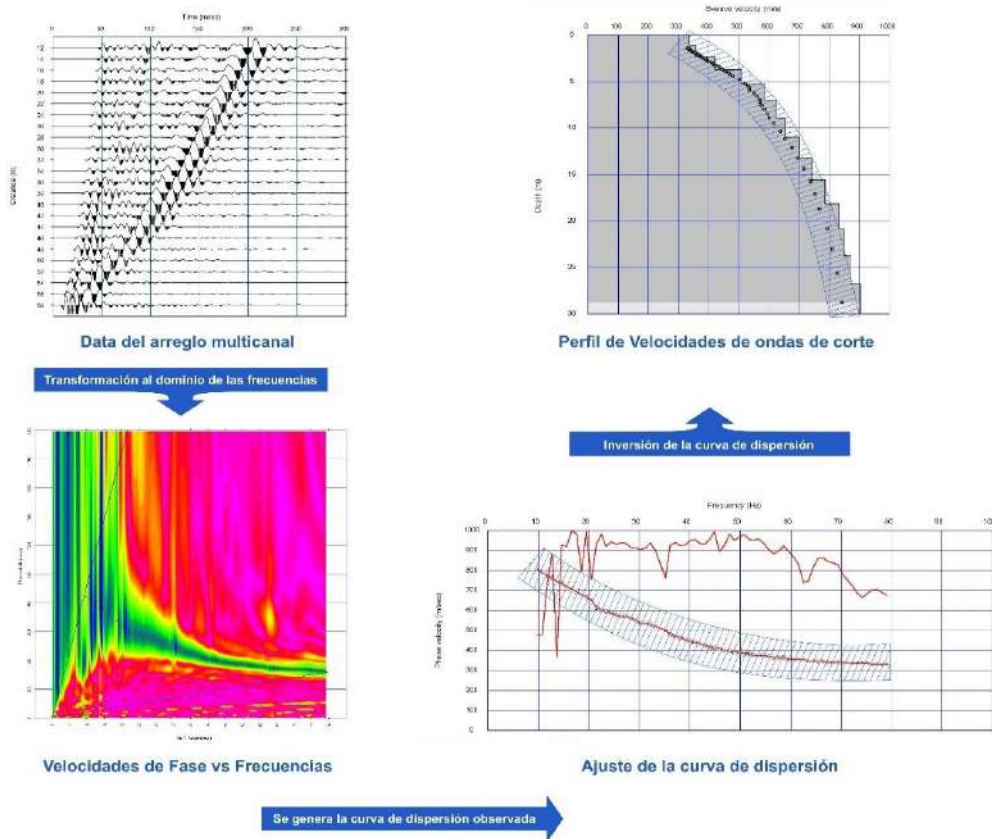
Donde:

- $\lambda$  : Longitud de Onda
- $f$  : Frecuencia natural de la onda
- $c$  : Velocidad de Fase



- $D$  : Profundidad de exploración
- $V_s$  : Velocidad de ondas de corte

Es importante resaltar que la forma que presente la curva de dispersión está fuertemente relacionada a la variación de la rigidez con la profundidad. Por lo tanto, el método MASW tiene la capacidad de identificar estratos más rígidos que yacen sobre estratos blandos.



**Figura 2.6. Proceso de obtención del perfil de velocidad de ondas de corte**

Esta técnica se ha venido utilizando con bastante frecuencia en la exploración geotécnica para la cimentación de diferentes tipos de estructuras, tales como: edificaciones, puentes, maquinarias, presas de tierra, presas de relaves y PAD's de lixiviación, entre otras, obteniéndose así buenas correlaciones con los perfiles estratigráficos del suelo en los casos donde se han realizado perforaciones diamantinas y ensayos de penetración estándar (SPT), motivo por el cual ha ganado confiabilidad y constituye una alternativa muy económica para la evaluación de los parámetros elásticos del suelo de fundación.

## 2.2 Equipo e Instrumentos Empleados

El equipo de prospección geofísica utilizado para la ejecución de los ensayos de refracción sísmica y MASW es un Sismógrafo GEODE-24 Canales, desarrollada por la empresa GEOMETRICS, el cual tiene las siguientes características:

- 24 canales de entrada, cada uno tiene un convertidor A/D individual con resolución 24 bits y alta velocidad de muestreo.
- 24 sensores o geófonos de 4.5 Hz de frecuencia, los cuales permiten registrar las vibraciones ambientales del terreno producidas por fuentes naturales o artificiales y el arribo de las ondas P y ondas S generadas por las fuentes de energía.
- Computadora portátil, Lap Top Core 2 Duo.
- Dos cables conectores de geófonos de 120 m.

- e) Baterías 12 V y accesorios varios.
- f) Fuente: Comba de 25 lb.

Los registros de las ondas sísmicas obtenidas en cada una de las líneas de exploración pueden ser procesados en el campo en forma preliminar y en forma definitiva en el gabinete, utilizando para ello programas de cómputo que permiten obtener las velocidades de propagación de las ondas S, así como el perfil sísmico unidimensional del terreno.

### 2.3 Descripción de las Actividades de Campo

Para realizar los ensayos de refracción sísmica y MASW primeramente se define el eje de la línea sísmica, luego se procede a instalar los geófonos y los cables de conexión al equipo de adquisición de datos. El espaciamiento entre geófonos es definido en función de la profundidad de exploración requerida y del área libre disponible en la zona de trabajo (ver Figura 2.7). El equipo utilizado cuenta con 24 canales y una longitud de cable máxima de 120 m.



Figura 2.7. Vista general del tendido del cable refracción y posicionamiento de geófonos.

En el ensayo de refracción sísmica y MASW la fuente de energía utilizada para generar las ondas sísmicas consistió en el golpe de un martillo de 20.0 lb sobre un plato metálico (Ver **Figura 2.8**).



Figura 2.8. Generación de la energía sísmica para el ensayo MASW.

De acuerdo a la información brindada por **PSV Constructores S.A.** previa coordinación con su supervisor, se establecieron las ubicaciones que fueron distribuidas según el emplazamiento de las estructuras proyectadas y las políticas de seguridad.

Asimismo, los perfiles sísmicos de los ensayos de refracción sísmica y MASW se encuentran en el *Anexo 1.1 Ensayo de refracción sísmica* y *Anexo 1.2 Modelo Unidimensional de Ondas de Corte MASW*.

## 2.4 Resultados e interpretación de resultados

Con los registros de las ondas sísmicas obtenidas en la línea de exploración sísmica realizada se determinó la curvas tiempo-distancia o dromocrónicas. Con esta información se realizó la interpretación del perfil sísmico de velocidades de ondas P ( $V_p$ ) que se presentan en el Anexo 1.1, su descripción se presenta a continuación.

### 2.4.1 Refracción sísmica

En el Anexo 1.1 se muestra la lámina LS-01, el anexo contiene el perfil sísmico del ensayo realizado en la zona de estudio.

La descripción del perfil sísmico se resume en la Tabla 03 y se detalla a continuación:

#### Perfil Sísmico LS-01

Este perfil se complementó con el sondaje MASW-01, el cual se realizó en el centro de la línea LS-01. Dicho perfil tiene 60.0 m de longitud. La interpretación de estos ensayos genera el perfil sísmico A-A', el cual muestra la presencia de dos estratos sísmicos.

El primer estrato presenta valores de velocidad de ondas P ( $V_p$ ) entre 200 m/s y 600 m/s, con un espesor variable de 13.0 m a 14.5 m. Estratigráficamente está conformado por un suelo mediamente denso.

El segundo estrato presenta velocidades de propagación de ondas P ( $V_p$ ) entre 600 m/s y 800 m/s, con un espesor variable de 7.0 m a 8.5 m. Estos valores de velocidad se incrementan con la profundidad. El estrato está conformado por un suelo denso.



### 2.4.2 Sondajes MASW

En el Anexo 1.2 se muestra las curva de dispersión y el modelo unidimensional de ondas de corte de los sondajes MASW. Para la clasificación el perfil de suelo, las velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) fueron comparadas con los rangos indicados en la Norma E.030 "Diseño Sismorresistente". La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30.0 m. La descripción del perfil sísmico se resume en la Tabla 06 y se detalla a continuación:

#### Sondaje MASW-01

Este ensayo MASW-01 tiene 66.0 m de longitud. En el cual se distinguió la presencia de dos estratos con propiedades elásticas diferentes.

El primer estrato presenta valores de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) entre 190 m/s y 330 m/s, con un espesor de 13.0 m. Estratigráficamente está conformado por un suelo mediamente denso.

El segundo estrato presenta valores de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) entre 370 m/s y 510 m/s, con un espesor de 17.0 m, estos valores de velocidad se incrementan con la profundidad. El estrato está conformado por un suelo denso.

### 3.0 CONSIDERACIONES SÍSMICAS

Se ha determinado la velocidad promedio de ondas de corte  $V_{s30}$  con el propósito de caracterizar sísmicamente el tipo de suelo. Para realizar ello, se tomará como referencia: la International Building Code (IBC), 2015.

$$V_{s30} = \frac{\sum d_i}{\sum \left(\frac{d_i}{V_{si}}\right)}$$

Donde:  
 $d_i$ : espesor de la capa  $i$   
 $V_{si}$ : Velocidad de onda de corte

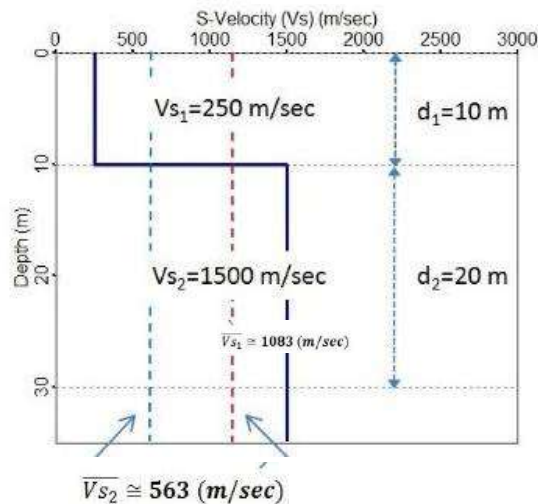


Figura 3.1. Cálculo de  $V_{s30}$

### 3.1 Clasificación del Sitio (Fuente: 2015 International Building Code)

Esta norma clasifica los suelos en 6 clases, tal como se presenta en Cuadro 3.1. Además, las clasificaciones del tipo de suelo de las áreas estudiadas han sido definidas en la Tabla 04: Clasificación del Sitio de los perfiles MASW (International Building Code (IBC), 2015). Esta clasificación ha sido definida en función a la velocidad de ondas de corte promedio de un estrato de 30 m de profundidad.



**Cuadro 3.1. Clasificación del Sitio (Fuente IBC, 2015)**

TIPO DE SUELO	NOMBRE DE SUELO	PROPIEDADES PROMEDIO EN LOS 30 PRIMEROS METROS		
		Velocidad de onda de corte, $\bar{V}_s$ (m/s)	Resistencia a la penetración estándar, $\bar{N}$	Resistencia al corte no drenada, $\bar{S}_{u}$ (psf)
A	Roca muy dura	$\bar{V}_s > 1,500$	N/A	N/A
B	Roca	$760 < \bar{V}_s \leq 1,500$	N/A	N/A
C	Suelo muy denso o roca blanda	$360 < \bar{V}_s \leq 760$	$\bar{N} > 50$	$\bar{S}_{u} \geq 2,000$
D	Suelo rígido	$180 \leq \bar{V}_s \leq 360$	$15 \leq \bar{N} \leq 50$	$1,000 \leq \bar{S}_{u} \leq 2,000$
E	Suelo blando	$\bar{V}_s < 180$	$\bar{N} < 15$	$\bar{S}_{u} < 1,000$
E	-	Cualquier perfil de suelo con más de 3 m de espesor que tenga las siguientes características: 1. Índice de plasticidad (IP) > 20 2. Contenido de humedad(w) $\geq 40\%$ y 3. Resistencia al corte no drenada $\bar{S}_{u} < 500$ psf		
F	-	Cualquier perfil de suelo que contenga una o más de las siguientes características: 1. Suelos vulnerables a una posible fractura o colapso bajo efecto sísmico, por ejemplo: suelos licuables, arcillas altamente sensibles y suelos débilmente cementados. 2. Turbas y/o arcillas altamente orgánicas (H > 3 m de turba y/o arcillas altamente orgánicas, donde H = espesor del suelo) 3. Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.6 m con índice de plasticidad IP > 75) 4. Arcillas gruesas suaves a medias (H > 36 m)		

### 3.2 Parámetros Elásticos

En la teoría de elasticidad de las ondas sísmicas (Kramer, 1996), la velocidad de las ondas P y S se representan en forma de ecuación de movimiento, para un cuerpo elástico isotrópico de la siguiente manera:

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Donde:

$v_p$ : Velocidad de ondas de compresión

$v_s$ : Velocidad de ondas de corte

$\lambda$ : Constante de Lamé

$\mu$ : Rigidez

$\rho$ : Densidad

Relacionando las velocidades de ondas de corte, ondas de compresión y la densidad de los materiales por donde se propagan las ondas se pueden obtener los siguientes parámetros elásticos:

$$\text{Relación de Poisson } (\nu) \quad \nu = \frac{(v_p/v_s)^2 - 2}{2(v_p/v_s)^2 - 2}$$

$$\text{Módulo de Young } (E_d) \quad E_d = 2(1 + \nu)G$$

$$\text{Módulo de Corte } (G_{m\acute{a}x}) \quad G_{m\acute{a}x} = \rho V_s^2$$

El Módulo de corte del suelo (G) es variable y decrece en función, principalmente, del incremento de las deformaciones de corte en el suelo. El módulo de corte máximo ( $G_{m\acute{a}x}$ ) asociado a pequeñas deformaciones, puede ser determinado mediante la velocidad de propagación de las Ondas de Corte ( $V_s$ ), las cuales pueden ser obtenidas in situ mediante

ensayos geofísicos. Se ha demostrado que valores de  $G_{m\acute{a}x}$  (o valores de  $E_{m\acute{a}x}$ ) factorados pueden ser de utilidad para evaluar los asentamientos de las cimentaciones (Fahey y Carter, 1993; Mayne, 2001). Sin embargo, debido a que el diseño de las cimentaciones está asociado a cargas últimas que puede soportar el suelo en la falla, donde el rango de deformaciones cortantes son muchos mayores, para estimar el asentamiento de una cimentación partiendo de parámetros elásticos máximos ( $G_{m\acute{a}x}$  o valores de  $E_{m\acute{a}x}$ ), estos deben ser reducidos. Por ejemplo, para el análisis del asentamiento de zapatas y losas de cimentación en arenas es conveniente utilizar el módulo cortante  $G$ , que corresponde a una deformación cortante de  $\gamma = 0.1\%$ . Fahey y Carter (1993) y Mayne (2001) proponen que el valor del módulo de corte  $G$  para una deformación cortante  $\gamma = 0.1\%$ , es equivalente al 20 % del módulo de elasticidad máximo, es decir  $G = 0.2 * G_{m\acute{a}x}$ . Al respecto, resultados de ensayos de laboratorio ejecutados para obtener el módulo de corte de suelos gravosos, para una deformación cortante  $\gamma = 0.1\%$ , el módulo de corte está entre 10 % a 20 % del valor del módulo de corte máximo (Araei, 2010), es decir  $G = 0.1 * G_{m\acute{a}x}$  a  $0.2 * G_{m\acute{a}x}$ .

En el Cuadro 3.2.1 se muestra los valores de  $G_{m\acute{a}x}$ ,  $E_{m\acute{a}x}$  y  $0.1 * E_{m\acute{a}x}$ , obtenidos mediante las velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) y los valores típicos de módulo de Poisson para suelos granulares, con las cuales se obtiene los valores de velocidad de ondas P ( $V_p$ ) acordes al tipo de material que se encuentra en la zona de estudio. Así como se le ha asignado valores de densidad de  $1.75 \text{ t/m}^3$  a  $1.8 \text{ t/m}^3$  como representativos para ambos estratos.

**Cuadro 3.2.1. Cálculo de Parámetros Elásticos MASW-01 – LS-01**

Suelo	Prof. (m)	$V_s$ (m/s)	$V_p$ (m/s)	$\rho$ ( $\text{t/m}^3$ )	$\mu$ (Poisson)	$G_{m\acute{a}x}$ ( $\text{t/m}^2$ )	$E_{m\acute{a}x}$ ( $\text{t/m}^2$ )	$E = 0.1 * E_{m\acute{a}x}$
Suelo medianamente denso	0.0 - 5.0	200	415	1.75	0.35	7135.58	19248.11	1924.81
Suelo medianamente denso	5.0 - 13.0	270	560	1.75	0.35	13004.59	35075.11	3507.51
Suelo denso	13.0 - 20.0	395	800	1.80	0.34	28628.44	76656.02	7665.60

## 4.0 PARÁMETROS DE DISEÑO SISMORRESISTENTE

La determinación de los parámetros de diseño sismorresistente han sido basados en la caracterización del perfil de suelos según la velocidad de propagación de onda, factor de zona y demás consideraciones según la norma E.030, 2016 Diseño Sismorresistente.

### 4.1 Determinación del tipo de Perfil de Suelo según la NTE E.030

A partir de los perfiles unidimensionales de ondas de corte obtenidos de los sondajes geofísico se ha calculado la velocidad promedio de ondas de corte para los primeros 30.0 m de profundidad del suelo ( $V_{s30}$ ) con el propósito de determinar el tipo de perfil sísmico al cual corresponde.

De acuerdo a la Norma Técnica E.030 "Diseño Sismorresistente" (2016), se ha comparado las velocidades de ondas de corte obtenidas con los rangos de velocidad característicos de cada perfil de suelo a fin de definir las condiciones de sitio, ver Cuadro 4.1.1.

**Cuadro 4.1.1. Clasificación de perfiles de suelo según E.030**

Clasificación	Perfil de suelo	$V_{s30}$ (m/s)
Roca dura	S <sub>0</sub>	≥1500.0
Roca o Suelos muy rígidos	S <sub>1</sub>	500.0 a 1500.0
Suelos Intermedios	S <sub>2</sub>	180.0 a 500.0
Suelos Blandos	S <sub>3</sub>	≤ 180.0

En base a ello, se indica las velocidades promedio de ondas de corte en los primeros 30.0 m de profundidad del terreno ( $V_{s30}$ ) obtenidos a partir de los sondajes MASW. Asimismo, se incluye la clasificación del perfil de suelo de acuerdo a la normativa vigente. Ver Cuadro 4.1.2.

**Cuadro 4.1.2.- Velocidades promedio de ondas de corte**

Ensayo	$V_{s30}$ (m/s)	Clasificación
MASW 01	341	S <sub>2</sub> : suelos intermedios

Las velocidades de ondas de corte de los primeros 30 metros de profundidad obtenidas de los sondajes MASW, se encuentra en un promedio de 341 m/s. Según el acápite 2.3.1.a de la Norma E.030. Diseño sismorresistente el “Perfil Tipo S<sub>2</sub>: Suelos intermedios” corresponde a los suelos con propagación de onda de corte  $V_{s30}$  entre 180 m/s y 500 m/s.

**4.2 Parámetros de sitio según Norma E.030 “Diseño Sismorresistente”**

Los siguientes son los factores a considerar en la construcción del espectro de diseño según los lineamientos de la norma E.030. Diseño sismorresistente, 2016:

- Tipo de perfil de suelo : S<sub>2</sub>
- Factor de zona (Z) : 0.45
- Factor de suelo (S) : 1.05
- Período predominante ( $T_p$ ) : 0.6 segundos
- Período predominante ( $T_L$ ) : 2.0 segundos

Por otra parte, el factor de amplificación sísmica (C) deberá ser obtenido considerando la siguiente expresión:

$$C = 2.5 \quad ; \quad T < T_p$$

$$C = 2.5 \cdot \left( \frac{T_p}{T} \right) \quad ; \quad T_p < T < T_L$$

$$C = 2.5 \cdot \left( \frac{T_p \cdot T_L}{T^2} \right) \quad ; \quad T > T_L$$

El espectro de diseño (Obtenido de la multiplicación de  $Z \cdot S \cdot C$ ) deberá ser usado en el análisis sismorresistente del futuro Proyecto. (Ver Figura 4.1)

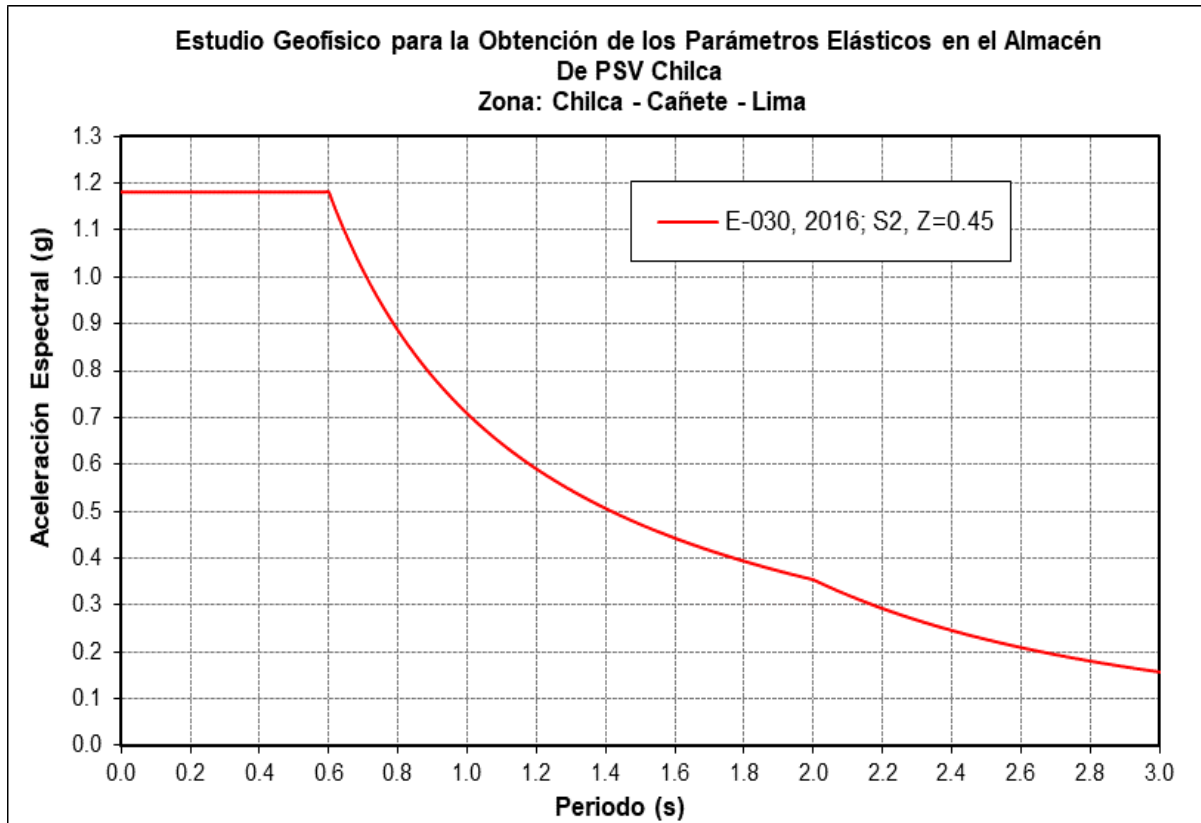


Figura 4.1. Espectro de diseño según la norma de diseño sismorresistente E.030, 2016

### 4.3 Fuerza horizontal equivalente

La fuerza horizontal o cortante total en la base debido a la acción sísmica se determinará mediante la siguiente expresión:

$$H = \frac{Z * U * S * C}{R} \times P$$

Donde:

- Z = Factor de Zona
- U = Factor de Uso
- S = Factor de suelo
- C = Coeficiente sísmico
- R = Factor de ductilidad
- P = Peso de la edificación

Un esquema del cortante basal se muestra en la Figura 4.2.

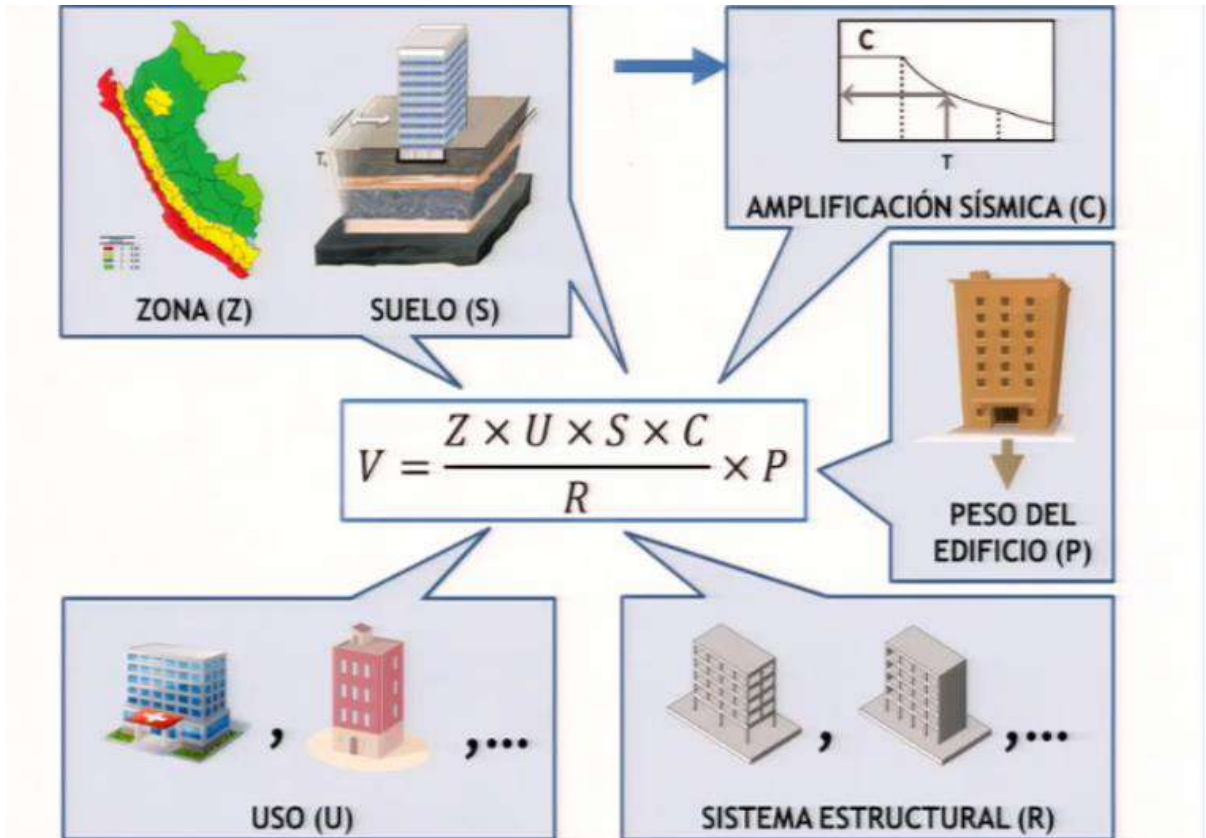


Figura 4.2. Representación gráfica de los parámetros de la norma E.030, 2016

## 5.0 CONCLUSIONES

1. En el presente **ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS ELÁSTICOS EN EL ALMACÉN DE PSV CHILCA**, se realizó el ensayo de Refracción Sísmica y el método de Análisis de Ondas Superficiales en Arreglo Multicanal (MASW), fue realizado a solicitud de la empresa **PSV Constructores S.A.** La zona de estudio se ubica en el distrito de Chilca, provincia de Cañete, departamento de Lima.
2. En función a la topografía y área disponible del terreno se realizó 01 sondaje de refracción sísmica y 01 sondajes MASW. La línea de refracción sísmica es de 60.0 m de longitud, y se alcanzó una profundidad de investigación máxima del subsuelo de 20.0 m. La línea sísmica del MASW es de 66.0 m de longitud, y se alcanzó una profundidad de investigación máxima del suelo de 30.0 m.
3. Se realizó la caracterización sísmica de sitio, mediante las velocidades de las ondas de corte de los 30 primeros metros. En base a la clasificación de la norma técnica peruana E.030, 2016 de Diseño Sismo Resistente, la zona de estudio califica como un suelo Tipo S2 (Suelo Intermedio), esta clasificación de suelo es consecuente con la clasificación de sitio del IBC 2015 correspondiente a un suelo Tipo D (Suelo firme o rígido) obtenidos de la exploración geofísica, cuyas velocidades promedio de ondas de corte  $V_{s30}$  se encuentra entre los 180 m/s y 360 m/s.
4. Según la Norma Técnica E.030 Diseño Sismo Resistente (SENCICO, 2016), la zona de estudio clasifica como un perfil de suelo tipo S2: suelos intermedios, con un periodo predominante  $T_P = 0.45$  s y un  $T_L = 2.0$  s. El proyecto se encuentra ubicado en la Zona Sísmica 4, por lo que le corresponde un factor de zona  $Z = 0.45$  y un factor de amplificación sísmica por perfil de suelo  $S = 1.05$ .
5. Cabe mencionar que los métodos de exploración geofísica llevadas a cabo en la zona de estudio, son pruebas no invasivas por lo que puede evaluarse la estructura natural de los suelos sin producir deformaciones en los mismos; y que comparándolas con los métodos directos permiten explorar el subsuelo a una profundidad de investigación razonable.
6. Las conclusiones del presente informe son aplicables sólo y exclusivamente para el proyecto materia de evaluación en este estudio.



## 6.0 REFERENCIAS

- [1] Chris H. Chapman (2004), *Fundamentals of Seismicwave Propagation*, Schlumberger Cambridge Research.
- [2] Mark E. Everett, *Near-Surface Applied Geophysics*, Texas A&M University.
- [3] Hayashi, K. (2003), "Data Acquisition and Analysis of Active and Passive Surface Wave Methods". Short Course - SAGEEP 2003.
- [4] Lankston, R. W., "High Resolution Refraction Data Acquisition and Interpretation", Geo-Compu-Graph, Inc., USA.
- [5] Miller, R. D., Pullan, S.E., Waldner, J. S., Haeni, F. P., (1986), "Field comparison of shallow seismic sources", *Geophysics*, Vol. 51, Nº 11, Pág. 2067 – 2092, USA.
- [6] Park, C.B., R. D. Miller, and J. Xia, Julian M. (1999), *Multichannel Analysis of Surface Waves to Map Bedrock*, Kansas Geological Survey. Lawrence, Kansas, USA.
- [7] Park, C., Miller, R., Xia, J., & Ivanov, J. 2001<sup>a</sup>. "Seismic characterization of geotechnical sites by Multichannel Analysis of Surfaces Waves (MASW) method". Tenth International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering (SDEE), Philadelphia, USA.
- [8] Redpath, B., B. (1973), "Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations", Explosive Excavation Research Laboratory Livermore, California, USA.
- [9] *Surface Wave Data Acquisition and Field Methods*, GEOMETRICS Inc., USA.
- [10] US Army Corps of Engineers, (1995), "Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations", Engineer Manual 1110-1-1802, Washington, USA.
- [11] Underwood, D.; Hayashi, K. (2006), *Surface Wave Data Acquisition and Field Methods*, Geometrics Inc, USA.





**Tabla 01: Ensayos Geofísicos – Refracción Sísmica**

Ensayo	Ubicación	Este (m)	Norte (m)	Longitud (m)	Tipo de Onda
LS-01	Inicio	312 471	8 616 545	60.0	Ondas P
	Fin	312 500	8 616 494		

**Tabla 02: Ensayos Geofísicos – Sondajes MASW**

Ensayo	Este (m)	Norte (m)	Longitud (m)	Tipo de Onda
MASW-01	312 488	8 616 516	66.0	Onda S

**Tabla 03: Descripción de Materiales y Velocidades de Ondas P – Refracción Sísmica**

Sondaje	Estrato	$V_p$ (m/s)	Espesor (m)	Descripción
LS-01	1	200 – 600	13.0 – 14.5	Suelo mediamente denso
	2	600 – 800	7.0 – 8.5	Suelo denso

**Tabla 04: Descripción de Materiales y Velocidades de Ondas S – Sondajes MASW**

Sondaje	Estrato	$V_s$ (m/s)	Espesor (m)	Descripción
MASW-01	1	190 – 330	13.0	Suelo mediamente denso
	2	370 – 510	17.0	Suelo denso

**Tabla 05: Clasificación de los perfiles de suelo de acuerdo a la velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ), E030-2016**

Clasificación	Perfil de suelo	$V_{s30}$ (m/seg)
Roca dura	S0	$\geq 1500.0$
Roca o Suelos muy rígidos	S1	500.0 a 1500.0
Suelos Intermedios	S2	180.0 a 500.0
Suelos Blandos	S3	$\leq 180.0$

$V_{s30}$  Velocidad de propagación de ondas de corte a los 30.0m superiores del perfil de suelo.





## **Anexo 1.0 – Ensayos Geofísicos**

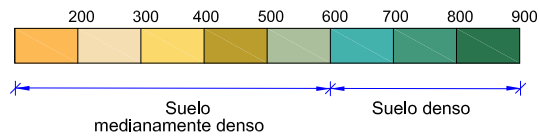
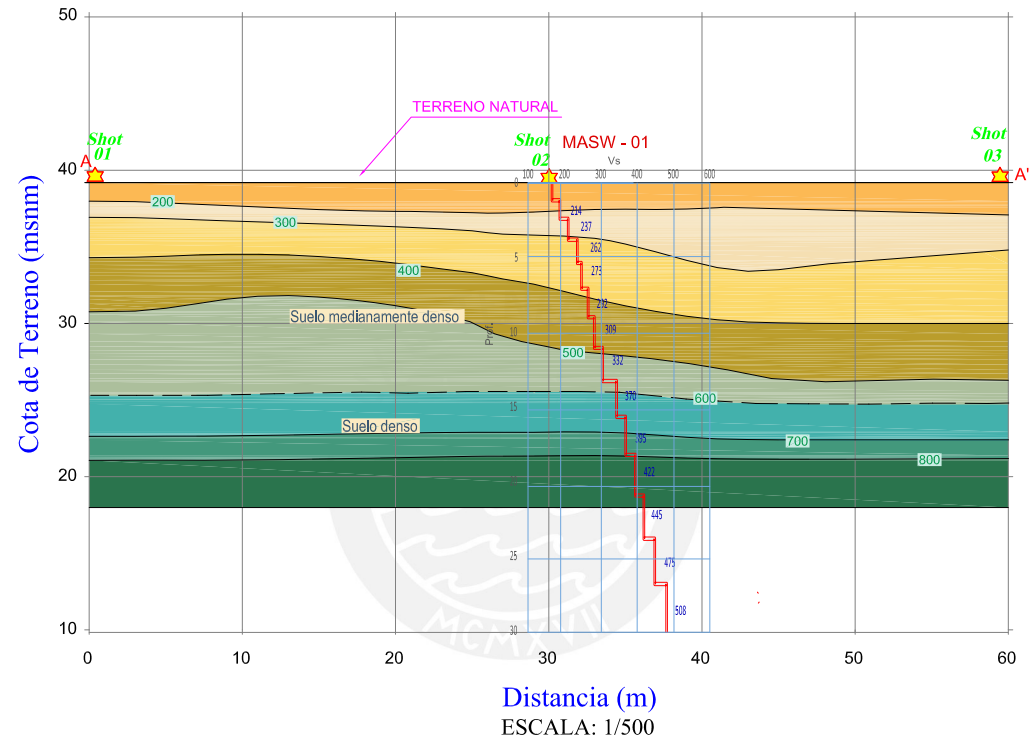
---



## **Anexo 1.1 – Ensayo Geofísico Refracción Sísmica**

---

# PERFIL SÍSMICO LÍNEA LS-01



LEYENDA	
	Superficie del terreno
	Estrato
	Punto de Impacto

Este plano se emitió y preparó por ZER Geosystem Perú S.A.C. y es para uso exclusivo del cliente, cuyo nombre aparece en el membrete y solo podrá utilizarse por el propietario del terreno, para fines exclusivamente relacionados con el proyecto de obra. No se permite su reproducción, modificación o uso para otros fines sin el consentimiento escrito por parte del propietario. Indiferente ZER Geosystem Perú S.A.C.

REV. N°	FECHA	PLANO. N°	PLANOS DE REFERENCIA	DESCRIPCIÓN DE LA REVISIÓN	DIB. DIS.	REV. APR.	ELABORADO POR:	ENCARGADOS	PROYECTO:	CLIENTE:	TÍTULO DE PROYECTO:
A	23-04-2018	L-01	PERFILES TOMOGRÁFICOS	EMITIDO PARA REVISIÓN	R.A.	R.A.	G.C., Z.A.	DIBUJADO POR: ING. RAUL ACHO DISEÑADO POR: ING. RAUL ACHO REVISADO POR: ING. MIGUEL RONCAL APROBADO POR: DR. ING. ZENÓN AGUILAR	ESTUDIO GEOFÍSICO	PSV	ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS ELÁSTICOS EN EL ALMACÉN DE PSV CHILCA
								NOTA: LAS UNIDADES DE LOS PLANOS ESTÁN EN EL SISTEMA INTERNACIONAL	PAIS: PERÚ DEPARTAMENTO: LIMA PROVINCIA: CAJETE DISTRITO: CHILCA	TÍTULO DE PLANO: PERFIL SÍSMICO LÍNEA LS-01	ESCALA: INDICADA Hojas: A4 CÓDIGO DE PROYECTO: P015-181 PSV CHILCA (2017)



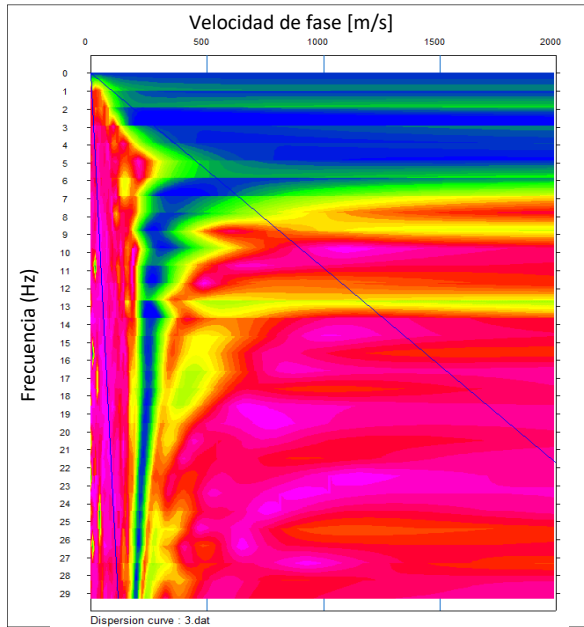
## **Anexo 1.2. – Ensayo Geofísico - Modelo Unidimensional de Ondas de Corte MASW**

---

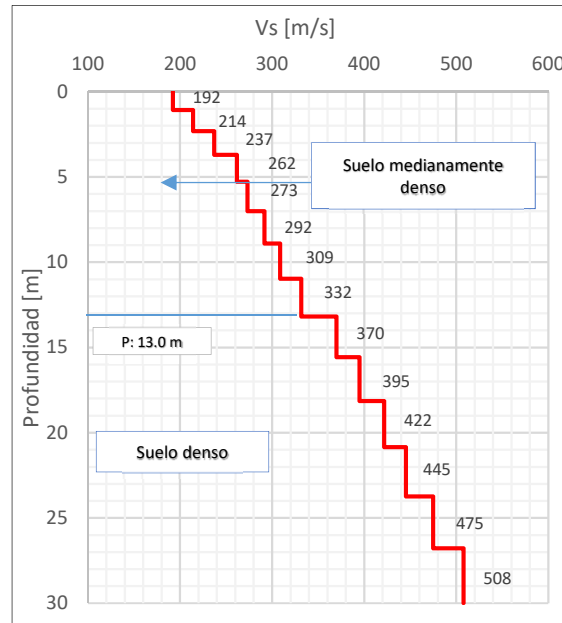
**MASW 01**

Ubicación: CHILCA - CAÑETE - LIMA	Sistema de coordenadas: UTM-WGS84-18S	Realizado: R.A.Q
	Coordenadas: E [m] 312 488 N [m] 8 616 516	Revisado: M.R.

Curva de dispersión



Perfil Unidimensional



Cuadro Resumen

d* [m]	Vs [m/s]	d/Vs
1.1	192	0.00557
1.2	214	0.00578
1.4	237	0.00591
1.6	262	0.00598
1.7	273	0.00633
1.9	292	0.00650
2.1	309	0.00667
2.2	332	0.00671
2.4	370	0.00646
2.6	395	0.00647
2.7	422	0.00645
2.9	445	0.00648
3.0	475	0.00642
3.2	508	0.00633
<b>Σ(d)</b>	<b>30.0</b>	<b>Σ(d/Vs)</b> <b>0.08806</b>

\*d: Espesor

Clasificación del Sitio (IBC, 2012)

Tipo de Suelo	Nombre del Suelo
D	Suelo Rígido

Clasificación del Sitio (E.030- 2016)

Clasificación	Perfil del Suelo
Suelos Intermedios	S2

\*Vs30  
[m/s]

341

\*Vs30: Velocidad de onda de corte promedio para los primeros 30m de profundidad



## **Anexo 2.0 – Panel Fotográfico**

---





## **Anexo 2.1 – Refracción Sísmica**

---

## GEOFÍSICA – REFRACCIÓN SÍSMICA



**Fotografía 01:** Vista panorámica de la zona de trabajo de la Línea de Refracción Sísmica LS-01. Se puede apreciar el tendido de la wincha de 60 m, el cable trigger y la posición de los geófonos en el terreno.



**Fotografía 02:** Momento realizando el impacto de la comba sobre el plato metálico correspondiente al Shot 01 del sondaje LS-01, empleado para la generación de ondas sísmicas.



## **Anexo 2.2 – MASW**

---

### GEOFÍSICA – MASW



**Fotografía 01:** Vista panorámica de la zona de trabajo donde se realizó el ensayo sísmico MASW-01. Se observa el personal realizando los shots correspondientes.

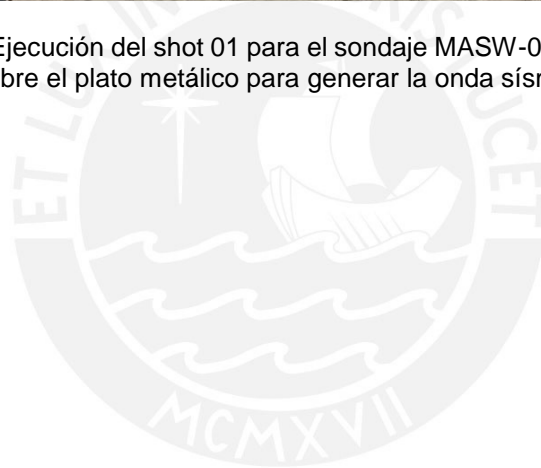


**Fotografía 02:** Se observa la instalación del equipo y el tendido de los cables sobre el terreno.





**Fotografía 03:** Ejecución del shot 01 para el sondaje MASW-01, la comba de 20 lb impacta sobre el plato metálico para generar la onda sísmica.





Este documento es propiedad de ZER Geosystem Perú S.A.C. y no debe ser utilizado sin el consentimiento expreso de la Gerencia General de ZER Geosystem Perú S.A.C.



UBICACIÓN - GEOFÍSICA				
ENSAYO	ESTE (m)	NORTE (m)	ONDA	LONGITUD (m)
MASW-01	312488	8616516	S	66.0
LS-01	A	312471	P	60.0
	A'	312500		

LEYENDA	
ENSAYO REFRACCIÓN SÍSMICA	
ENSAYO MASW	

REV. N°	FECHA	PLANO. N°	PLANOS DE REFERENCIA	DESCRIPCIÓN DE LA REVISIÓN	DIB.	DIS.	REV.	APR.	ELABORADO POR:
A	23/04/2018	01	PERFIL SÍSMICO	Emitido para revisión	R.A.	R.A.	M.R.	Z.A	



ENCARGADOS	PROYECTO:	ESTUDIO GEOFÍSICO
DIBUJADO POR: R.A.Q	PAIS:	PERÚ
DISEÑADO POR: ING. RAUL ACHO	DEPARTAMENTO:	LIMA
REVISADO POR: ING. MIGUEL RONCAL	PROVINCIA:	CAÑETE
APROBADO POR: DR. ING. ZENÓN AGUILAR	DISTRITO:	CHILCA
NOTA: LAS UNIDADES DE LOS PLANOS ESTAN EN EL SISTEMA INTERNACIONAL		



TÍTULO DE PROYECTO:	ESTUDIO GEOFÍSICO PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS ELÁSTICOS EN EL ALMACÉN DE PSV CHILCA	
TÍTULO DE PLANO:	EXPLORACION GEOFÍSICA	
ESCALA:	INDICADA	PROYECCIÓN: UTM
CÓDIGO DE PROYECTO:	P015-181 PSV CHILCA (2017)	DATUM-ZONA: WGS84-18S
PLANO:	P-01	

# **ANEXO 3**

**PROTOSCOLOS DEL ENSAYO PDA**







**PRUEBA DINAMICA PARA PILOTES (PDA)  
ASTM D 4945**

PSV - SGI

Ver. 02

08-04-14

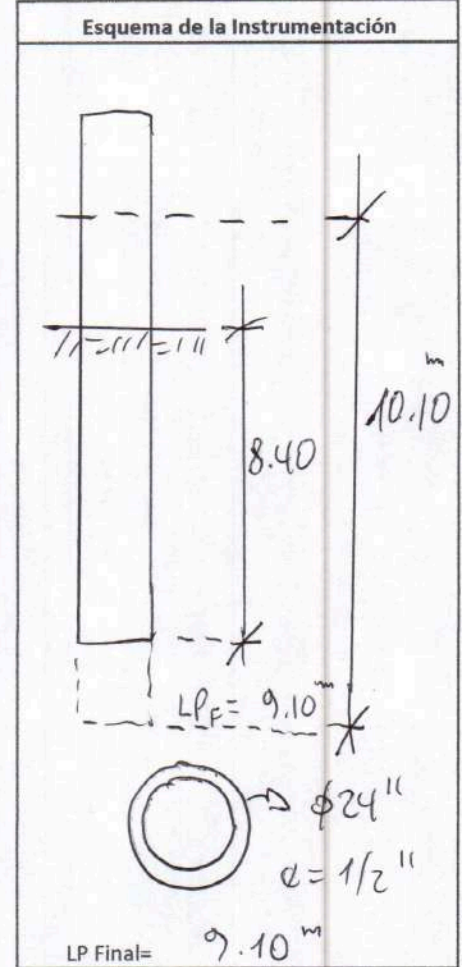
Fecha: 14/06/2018

Hora de Inicio: 10h 25

Hora de Termino: 10h 40

Información General	
Cliente:	PSV
Obra:	ENSAYO CARGA LATERAL
Lugar:	CHILCA - PERU
Fabricante del Pilote:	—
Tipo de Pilote:	TUBO ACERO HINCADO

Característica de Pilote Ensayado	
Codigo en Proj. PN	PR-1
Datos del Pilote:	ASTMA572 60 50 ( $f_y = 355 \text{ MPa}$ )
Diámetro	# 24" $e = 1/2"$
Área de sección (cm <sup>2</sup> )	238.153
Perimetro (m)	1.915
Sección Llena (cm <sup>2</sup> )	2918.153
WS (m/s)	5123
p (tf/m <sup>2</sup> )	7.88
E (tf/cm <sup>2</sup> )	2109
Data Instalación	14/6/18
Reh.	— días
Carga de Prueba	—
Carga de Trabajo (FS)	—



Características del Martillo de Ensayo	
Tipo Martillo	PILECO 346-32
RAM (ton)	5.0
Energía Fab. (Ton-m)	14.860
Otros	- AMOQTIGUADOR METAL - POSICION 02/04

Datos de la Instalación del Pilote	
Tipo Martillo	PILECO 346-32
Energía Fab. (Ton-m)	14.860
Rechazo (Nro. Golpes/10cm)	6-6-7

Longitudes	
Long. Total (m)	11.00
Long. Instr. (m) LE	10.10
Long. Hincada (m) LP	8.40

Sensores:	A1:	A2:	A3:	A4:	F1:	F2:	F3:	F4:
(1)	K1948 (336)	K3645 (380)			I525 (95.1)	P837 (145.3)		
(2)								

Parametros de Ensayo - (Ultimos 18 Registros)									
Nro. Golpes	7	7	7	8	7	8			
Altura Caída (cm)									
Rechazo (mm)									
Asentamiento (mm)	100	100	100	100	100	100			

Nro. Golpes								
Altura Caída (cm)								
Rechazo (mm)								
Asentamiento (mm)								

**Observaciones**

—

—

—

**Elaborado Por:**

Ing°: Julio LARA LLACAS

Firma: MSc ING. JULIO LARA LLACAS  
CIP N° 401750  
CONSULTOR ESPECIALISTA

**Revisado por:**

Ing°: \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_

**Visto por:**

Ing°: \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_





**PRUEBA DINAMICA PARA PILOTES (PDA)  
ASTM D 4945**

PSV - SGI

Ver. 02

08-04-14

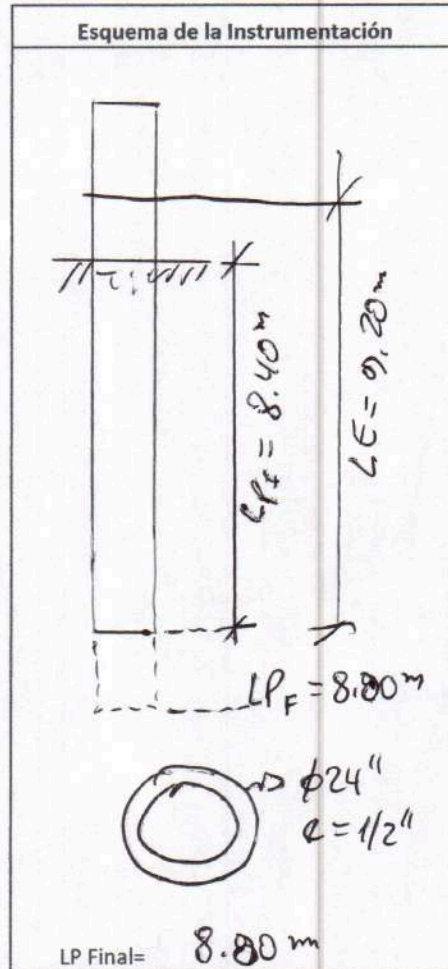
Fecha: 07/06/2018

Hora de Inicio: 11h30

Hora de Termino: 11h50

Información General	
Ciente:	PSV
Obra:	ENSAYO CARGA LATERAL
Lugar:	CHILCA - PERU
Fabricante del Pilote:	—
Tipo de Pilote:	TUBO ACERO HINCADO

Característica de Pilote Ensayado	
Codigo en Proj. PN	PP-01
Datos del Pilote:	ASTM A572
	6250 ( $S_y = 355 MPa$ )
Diámetro	# 24" $e = 1/2"$
Área de sección (cm <sup>2</sup> )	238.153
Perimetro (m)	1.915
Sección Llena (cm <sup>2</sup> )	2918.153
WS (m/s)	5123
P (tf/m <sup>2</sup> )	7.88
E (tf/cm <sup>2</sup> )	2109
Data Instalación	5/06/18
Reh.	2 días
Carga de Prueba	—
Carga de Trabajo (FS)	—



Características del Martillo de Ensayo	
Tipo Martillo	PILECO D46-32
RAM (ton)	5.0
Energía Fab. (Ton-m)	14.860
Otros	- AMORTIGUADOR METAL/METAL - POSICIÓN (02)/04

Datos de la Instalación del Pilote	
Tipo Martillo	PILECO D46-32
Energía Fab. (Ton-m)	14.860
Rechazo (Nro. Golpes/10cm)	6-6-6

Longitudes	
Long. Total (m)	10.40
Long. Instr. (m) LE	9.20
Long. Hincada(m) LP	8.40

Sensores:	A1:	F1:
	K1948 (336)	F1: IS25 (95.1)
	A2: K3645 (380)	F2: P 837 (145.3)
	A3:	F3:
	A4:	F4:

Parametros de Ensayo - (Ultimos 18 Registros)							
Nro. Golpes	12	11	11	11			
Altura Caída (cm)							
Rechazo (mm)	—	—	—	—			
Asentamiento (mm)	100	100	100	100			
Nro. Golpes							
Altura Caída (cm)							
Rechazo (mm)							
Asentamiento (mm)							

**Observaciones**

—

—

—

**Elaborado Por:**

Ing°: Julio Lara Llacas

MSc ING. JULIO LARA LLACAS  
C.R.N° 101750  
CONSULTOR ESPECIALISTA

**Revisado por:**

Ing°: \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_

**Visto por:**

Ing°: \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_

# **ANEXO 4**

**PROTOCOLOS DE PILOTES  
HINCADOS**



Servicio: ENSAYO CARGA LATERAL

Cliente: PSV

Fecha: 14/06/2018

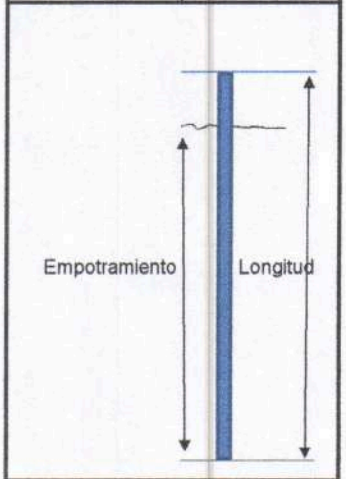
Ubicación: ALMACEN CHILCA - PERU

Página: 1-1

Penet. (cm.)	Ratio x 10 (cm.)	Hora	Penet. (cm.)	Ratio x 10 (cm.)	Hora	Penet. (cm.)	Ratio x 10 (cm.)	Hora	Penet. (cm.)	Ratio x 10 (cm.)	Hora
0.00			5.00	4		10.00			15.00		
10	PP		10	4		10			10		
20			20	4		20			20		
30	P+M	8.30	30	5		30			30		
40	> 1		40	5		40			40		
50	> 1		50	4		50			50		
60	> 1		60	5		60			60		
70	> 1		70	5		70			70		
80	> 1		80	6		80			80		
90	> 1		90	5		90			90		
1.00			6.00	5		11.00			16.00		
10	> 1		10	6		10			10		
20	> 1		20	5		20			20		
30	> 1		30	5		30			30		
40	> 1		40	6		40			40		
50	> 1		50	5	8.44	50			50		
60	2		60	5	10.27	60			60		
70	1		70	5		70			70		
80	1		80	5		80			80		
90	1		90	5		90			90		
2.00			7.00	5		12.00			17.00		
10	1		10	6		10			10		
20	1		20	5		20			20		
30	1		30	6		30			30		
40	1		40	6		40			40		
50	1		50	6		50			50		
60	2		60	6		60			60		
70	2		70	6		70			70		
80	2		80	6		80			80		
90	2		90	6		90			90		
3.00			8.00	5		13.00			18.00		
10	2		10	6		10			10		
20	2		20	6		20			20		
30	3		30	6		30			30		
40	3		40	6		40			40		
50	3		50	6	10.30	50			50		
60	4		60	7	10.37	60			60		
70	3		70	7	PDA	70			70		
80	4		80	7		80			80		
90	4		90	8		90			90		
4.00			9.00	7		14.00			19.00		
10	4		10	8	10.38	10			10		
20	4		20			20			20		
30	4		30			30			30		
40	5		40			40			40		
50	5		50			50			50		
60	8		60			60			60		
70	4		70			70			70		
80	4		80			80			80		
90	5		90			90			90		

PILOTE ID.: PR-1

Tipo Sección:	TUBO ACERO
Diametro/ Lado:	Ø 24"
Espesor:	t = 1/2"
Material/ Tipo:	ACERO ASTM A572 6250
Nro. Tramos:	1
Relación H:V =	1:1
Martillo:	PILECO D46-32
Energía/ Poder Máximo:	14.860 Ton.m
Nro. Golpes por Minuto a nivel de rechazo:	40-60
Carga Admisible Requerida:	—
Ratio de Penetración Min. Requerido:	—
Cota de Fondo de Penetración Mínimo:	—



PP: Peso Propio, P+M: Pilote + Martillo

Excentricidad:  mm  Cumple la tolerancia  No cumple la tolerancia

Observaciones: POSICION (02) MARTILLO  
PRUEBA PDA 8.60 m - 9.10 m (14/6/18)

Longitud Total (Sin Descabezar): 11.00 m  
Longitud (Empotramiento): 9.10 m  
Cota de Fondo Final: —

Ratio: Golpes (Martillo Hincado) Segundos (Vibrohammer)

ELABORADO POR: PSV: RENZO SUITO	VERIFICADO POR: PSV: JULIO LARA LLACAS MIS. ING. JULIO LARA LLACAS CIP. N° 101750 CONSULTOR ESPECIALISTA	VISTO POR: CLIENTE
Fecha: 14/06/18	Fecha: 14/06/18	Fecha: —



Servicio: ENSAYO CARGA LATERAL

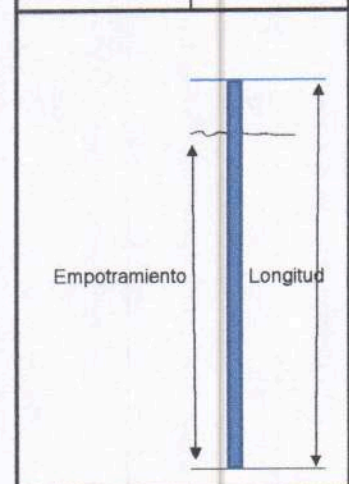
Cliente: PSV  
Ubicación: ALMACEN CHILCA - PERU

Fecha: 07/06/2018  
Página: 1-1

Penet. (cm.)	Ratio x 10 (cm.)	Hora	Penet. (cm.)	Ratio x 10 (cm.)	Hora	Penet. (cm.)	Ratio x 10 (cm.)	Hora	Penet. (cm.)	Ratio x 10 (cm.)	Hora
0.00	PP	11:15	5.00	4		10.00			15.00		
10	PP+M	5/6/18	10	4		10			10		
20			20	4		20			20		
30			30	4		30			30		
40			40	4		40			40		
50	1		50	4		50			50		
60	1		60	4		60			60		
70	1		70	4		70			70		
80	1		80	4		80			80		
90	1		90	4		90			90		
1.00	1		6.00	5		11.00			16.00		
10	1		10	5		10			10		
20	1		20	5		20			20		
30	1		30	5		30			30		
40	1		40	5		40			40		
50	1		50	5		50			50		
60	1		60	5		60			60		
70	1		70	5		70			70		
80	1		80	5		80			80		
90	1		90	5		90			90		
2.00	1		7.00	5		12.00			17.00		
10	1		10	5		10			10		
20	2		20	5		20			20		
30	2		30	5		30			30		
40	2		40	5		40			40		
50	2		50	5		50			50		
60	2		60	5		60			60		
70	2		70	5		70			70		
80	2		80	5		80			80		
90	2		90	5		90			90		
3.00	3		8.00	6		13.00			18.00		
10	3		10	6		10			10		
20	3		20	6		20			20		
30	3		30	6	13:00	30			30		
40	3		40	6	5/6/18	40			40		
50	3		50	12	7/6/18 PDA	50			50		
60	3		60	11	7/6/18	60			60		
70	3		70	11		70			70		
80	3		80	11	11:50	80			80		
90	3		90	11	7/6/18	90			90		
4.00	3		9.00			14.00			19.00		
10	3		10			10			10		
20	3		20			20			20		
30	3		30			30			30		
40	3		40			40			40		
50	3		50			50			50		
60	3		60			60			60		
70	3		70			70			70		
80	3		80			80			80		
90	3		90			90			90		

PILOTE ID.: PP - 1

Tipo Sección:	TUBO ACERO
Diametro/ Lado:	Ø 24"
Espesor:	e = 1/2"
Material/ Tipo:	ACERO ASTM A572 GR50
Nro. Tramos:	1
Relación H:V =	1:1
Martillo:	PILECO D46-32
Energía/ Poder Máximo:	14.860 TON
Nro. Golpes por Minuto a nivel de rechazo:	40-60
Carga Admisible Requerida:	—
Ratio de Penetración Min. Requerido:	—
Cota de Fondo de Penetración Mínimo:	—



PP: Peso Propio, P+M: Pilote + Martillo

Excentricidad:  mm  Cumple la tolerancia  No cumple la tolerancia

Observaciones: PRUEBA PDA 8.40m - 8.80m (7/6/18)  
POSICIÓN (2) MARTILLO

Longitud Total (Sin Descabezar): 10.40 m  
Longitud (Empotramiento): 8.80 m  
Cota de Fondo Final: —

Ratio: Golpes (Martillo Hincado) Segundos (Vibrohammer)

ELABORADO POR:	VERIFICADO POR:	VISTO POR:
PSV: RENZO SUITO	PSV: Julio LARA	CLIENTE
	MSc ING. JULIO LARA LLACAS CIP. N° 101750	
Fecha: 7/6/18	Fecha: 7/6/18	Fecha:

PRUEBA CHILCA - PP2

TUBO ACERO HINCADO

OP: JLLL

Date: 21-junio-2018

AR: 238.15 cm<sup>2</sup>

SP: 77.3 kN/m<sup>3</sup>

LE: 9.0 m

EM: 206,843 MPa

WS: 5,123.0 m/s

JC: 0.58

RMX: Max Case Method Capacity

FMX: Maximum Force

CSX: Max Measured Compr. Stress

DMX: Maximum Displacement

CSI: Max F1 or F2 Compr. Stress

TSX: Tension Stress Maximum

EMX: Max Transferred Energy

ETR: Energy Transfer Ratio - Rated

BL#	Depth m	BLC bl./10m	RMX kN	CSX MPa	CSI MPa	EMX kN-m	FMX kN	DMX mm	TSX MPa	ETR (%)
1	8.0	3	993	147.7	151.1	38.92	3,518	30.72	16.3	26.7
2	8.0	3	1,398	162.9	184.7	55.65	3,879	38.81	26.0	38.2
3	8.1	3	1,321	144.6	171.5	45.43	3,445	33.19	14.6	31.2
4	8.1	3	1,307	145.4	162.1	43.62	3,464	31.30	18.6	29.9
5	8.1	4	1,275	145.6	172.2	45.10	3,468	32.09	20.9	30.9
6	8.2	4	1,343	161.4	183.1	54.20	3,844	36.48	33.1	37.2
7	8.2	4	1,377	155.2	180.8	47.55	3,697	32.65	27.0	32.6
8	8.2	4	1,427	154.6	178.4	47.85	3,683	32.03	25.1	32.8
9	8.2	3	1,329	153.6	180.5	45.91	3,657	30.85	26.5	31.5
10	8.3	3	1,399	150.6	176.2	45.50	3,586	30.04	23.4	31.2
11	8.3	3	1,417	153.7	178.4	49.88	3,661	32.09	24.0	34.2
12	8.3	3	1,490	162.5	188.7	53.47	3,871	33.19	31.5	36.7
13	8.4	3	1,439	165.1	192.0	52.17	3,932	32.84	31.0	35.8
14	8.4	3	1,487	163.4	192.5	53.46	3,891	32.21	31.4	36.7
15	8.4	4	1,500	164.1	193.1	51.41	3,909	31.40	30.0	35.3
16	8.5	4	1,519	163.9	193.4	50.73	3,904	30.93	30.1	34.8
17	8.5	4	1,472	168.5	196.0	53.81	4,012	32.16	34.3	36.9
18	8.5	4	1,548	168.2	201.0	53.31	4,006	32.48	33.9	36.6
19	8.5	4	1,497	166.7	200.4	51.89	3,971	31.53	33.5	35.6
20	8.6	4	1,442	172.3	205.0	58.85	4,104	34.57	37.6	40.4
21	8.6	4	1,745	180.4	216.6	47.75	4,297	28.19	36.5	32.8
22	8.6	4	1,306	148.2	160.4	49.46	3,529	32.30	13.1	33.9
23	8.6	4	1,725	192.5	199.6	68.16	4,585	38.27	46.9	46.8
24	8.7	4	1,770	181.0	190.7	60.90	4,310	34.47	31.2	41.8
25	8.7	4	1,486	174.4	184.1	56.48	4,153	32.56	25.7	38.8
26	8.7	4	1,495	183.9	191.7	64.63	4,380	36.22	34.7	44.4
27	8.7	4	1,494	184.6	192.3	65.54	4,395	36.52	35.4	45.0
28	8.8	4	1,614	183.1	193.3	63.18	4,361	34.97	34.7	43.4
29	8.8	4	1,634	178.3	189.0	43.48	4,247	25.92	25.8	29.8
30	8.8	4	1,039	73.4	87.9	6.33	1,748	5.95	11.6	4.3
Average			1,443	161.7	182.9	50.82	3,850	31.90	28.1	34.9
Std. Dev.			169	21.0	22.2	10.80	499	5.50	7.9	7.4
Maximum			1,770	192.5	216.6	68.16	4,585	38.81	46.9	46.8
@ Blow#			24	23	21	23	23	2	23	23
Minimum			993	73.4	87.9	6.33	1,748	5.95	11.6	4.3
@ Blow#			1	30	30	30	30	30	30	30

Total number of blows analyzed: 30

BL# Comments

1 INICIO (8h40)

PRUEBA CHILCA - PP2  
OP: JLLL

TUBO ACERO HINCADO  
Date: 21-junio-2018

---

22 GOLPE ANALIZADO  
30 FINAL (08h43)

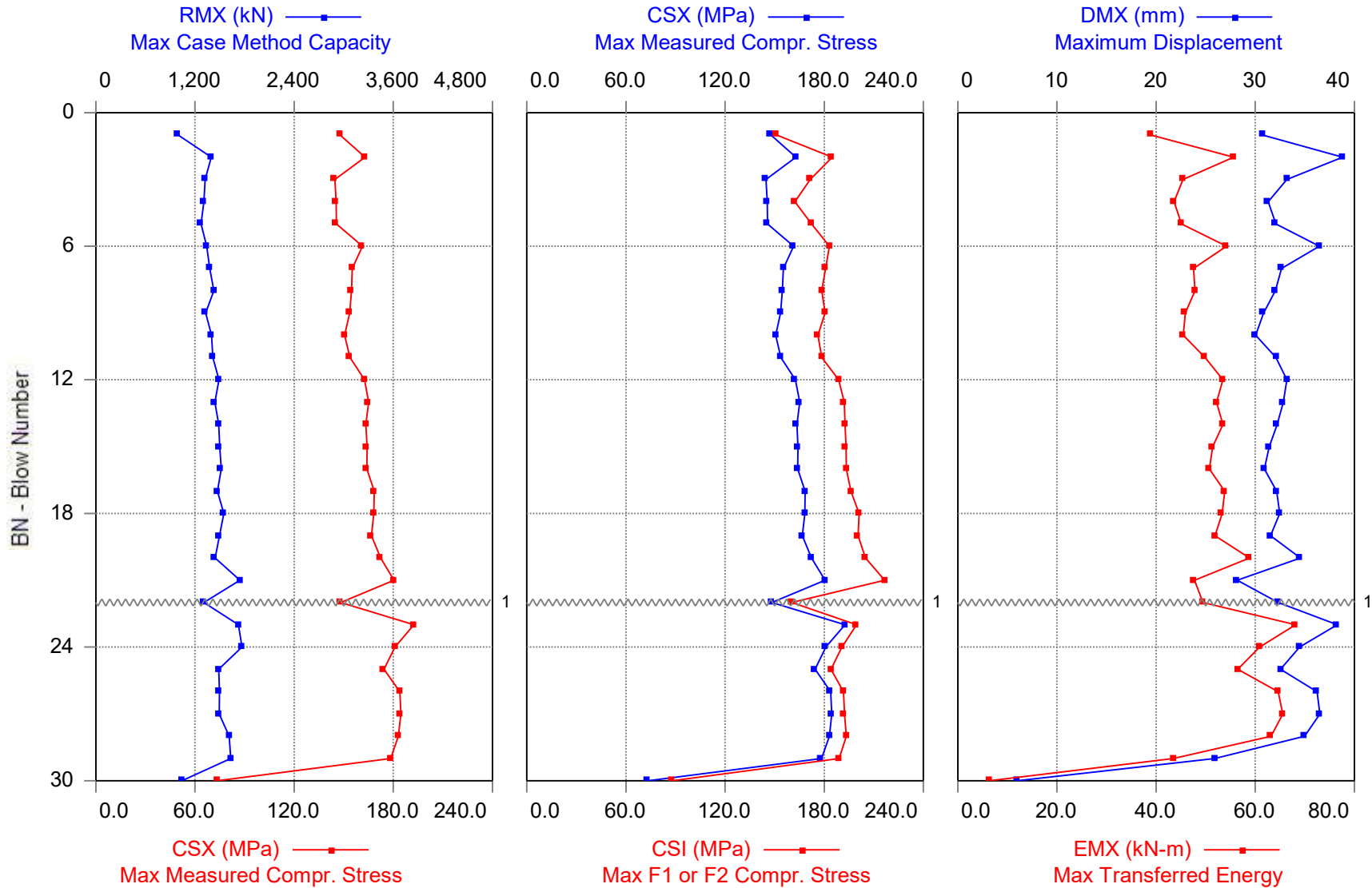
Time Summary

Drive 2 minutes 22 seconds 08:40 - 08:42 BN 1 - 30





PRUEBA CHILCA - PP2



1 - GOLPE ANALIZADO



# **ANEXO 5**

**PRUEBA DE CARGA LATERAL**



	<b>PRUEBA DE CARGA ESTATICA PARA PILOTES</b>	<b>PSV - SGI</b>	
		Ver. 02	08-04-14

<b>Fecha:</b>	<b>Hora de Inicio:</b>	<b>Hora de Termino:</b>
<b>CLIENTE:</b> PSV		
<b>OBRA:</b> Almacén Central		
<b>LUGAR:</b> Chilca, Lima, Perú		
<b>TIPO DE PRUEBA ESTATICA:</b> COMPRESION <input type="checkbox"/> TRACCION <input type="checkbox"/> LATERAL <input checked="" type="checkbox"/>		
<b>CARGA DE DISEÑO:</b> 15 TON	<b>CARGA DE PRUEBA:</b> 30 TON	

**INFORMACION DEL ENSAYO:** HORA INICIO: 10:27 HORA FINAL: 15:00 14/06/2018

PRESION (PSI)	PRESION (BAR)	AREA PISTON (CM2)	CARGA (TON)	TIEMPO (MIN)	HORA INICIO	HORA FINAL	LECTURA DIAL 01 (mm)	LECTURA DIAL 02 (mm)	LECTURA DIAL 03 (mm)	LECTURA DIAL 05 (mm)	LECTURA DIAL 06 (mm)	LECTURA DIAL 04 (mm)
							WY-1700574	WY-1700572	WY-1700576	WY-1700595	WY-1701596	WY-1701949
0.00	0.00	86.59	0.0	--	10:27	10:27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
615.96	42.47	86.59	3.8	10	10:27	10:37	2.80	3.42	3.34	1.37	0.02	-0.24
1231.92	84.94	86.59	7.5	10	10:37	10:47	4.30	5.31	5.14	2.11	0.04	-0.48
1847.89	127.41	86.59	11.3	15	10:47	11:02	7.40	8.97	8.71	3.81	0.13	-1.36
<b>2463.85</b>	<b>169.88</b>	<b>86.59</b>	<b>15.0</b>	<b>20</b>	<b>11:02</b>	<b>11:22</b>	<b>11.39</b>	<b>13.63</b>	<b>13.30</b>	<b>6.74</b>	<b>1.58</b>	<b>-3.08</b>
3079.81	212.35	86.59	18.8	20	11:22	11:42	14.34	16.97	16.62	8.39	1.69	-4.79
3695.77	254.81	86.59	22.5	20	11:42	12:02	18.22	21.4	20.96	10.8	2.25	-7.42
4188.54	288.79	86.59	25.5	20	12:02	12:22	21.87	25.45	25.1	13.16	2.85	-10.29
4434.93	305.78	86.59	27.0	20	12:22	12:42	23.74	27.44	27.15	14.54	3.36	-11.83
4681.31	322.77	86.59	28.5	20	13:02	13:22	25.52	29.47	29.17	15.76	3.55	-13.34
<b>4927.70</b>	<b>339.75</b>	<b>86.59</b>	<b>30.0</b>	<b>60</b>	<b>13:22</b>	<b>14:22</b>	<b>27.59</b>	<b>31.64</b>	<b>31.57</b>	<b>16.13</b>	<b>2.6</b>	<b>-14.87</b>
3695.77	254.81	86.59	22.5	10	14:22	14:32	26.61	29.98	29.06	15.75	3.56	-13.85
2463.85	169.88	86.59	15.0	10	14:32	14:42	24.22	26.74	25.06	13.95	3.88	-11.75
1231.92	84.94	86.59	7.5	10	14:42	14:52	18.91	20.29	18.65	9.58	1.94	-8.62
0.00	0.00	86.59	0.0	---	14:52	15:00	9.67	10	8.33	4.88	0.88	-4.54

<b>Observaciones</b>		
<b>Elaborado</b>	<b>Revisado</b>	<b>Visto por:</b>
		
<b>Ing°:</b> ING. LEYLA RIVERA SAM	<b>Ing°:</b> ING. LUIS PORTALINO SEGUNDO	<b>Ing°:</b> MARIO PEÑA FUENTES GERENTE GENERAL
<b>Firma:</b> JEFE DE PROYECTOS	<b>Firma:</b> GERENTE PRODUCCION	<b>Firma:</b>

# **ANEXO 6**

**CERTIFICADO DE CALIBRACION  
DE LOS SENSORES DE  
DESPLAZAMIENTO**



# 浙江省方正校准有限公司

Zhejiang Province FangZheng Calibration Co., Ltd.

## 校准证书

Calibration Certificate

证书编号: FZJX-2018035098 号

Certificate No.:

委托方 Customer	浙江欧感机械制造有限公司 Zhejiang Ougan Machinery Co., Ltd
地址 Address of Customer	/
器具名称 Name of Instrument	静载荷测试仪 (位移部分) Static Load Tester (Displacement Sensor)
型号规格 Type/Specification	FP-50I
出厂编号 Serial No.	见内页
制造单位 Manufacturer	武汉中岩科技有限公司 Wuhan Sinorock Technology Co., Ltd

校准日期  
Date of Calibration

2018 年 03 月 13 日  
Year month day

发证单位(专用章)

Stamp

校准专用章(1)

批准:  
Approved by

缪建

职务:  
Function

工程师

校准:  
Calibrated by

叶欣

核验:  
Checked by

周阿青



微信公众号

地址:浙江省杭州市下沙路 300 号  
Address: No.300, XiaShaRoad, HangZhou, Zhejiang

传真(Fax): 0571-87850633

电话(Tel): 0571-87855155, 87855133

网址(Website): www.zjufc.com





一、校准所依据的技术文件 (代号、名称):

Calibration Regulation (Code、Name)

GB/T 1958-2017 《产品几何技术规范 (GPS) 几何公差 检测与验证》

GB/T 1958-2004 《 Geometrical Product Specifications ( GPS ) -Geometrical tolerance-Verification prescription》

二、校准环境条件及地点:

Place and environmental conditions of the calibration

地点:

Place

Length Metrology Institute Precision Laboratory

温度:

Temperatur

20°C

相对湿度:

R. H.

   %

三、本次校准所用主要测量设备:

Equipment used in this calibration

名称 Name	测量范围 Measuring range	不确定度/准确度等级/ 最大允许误差 Uncertainty/Accuracy/max imum permissible errors	证书编号 Certificate No.	有效期至 Valid date to
量块 Gauge	(0.5~100) mm	三等 Class Three Accuracy	CD-201700128	2018-11-02

本次校准用计量标准器具的量值均可溯源至国家基准。

The value of equipment used in this calibration is traced to those of the national primary standards in the P. R. China.

四、校准结果/说明:

Results of calibration and additional explanation

See the continued pages

正校



准专用章

ZJIM

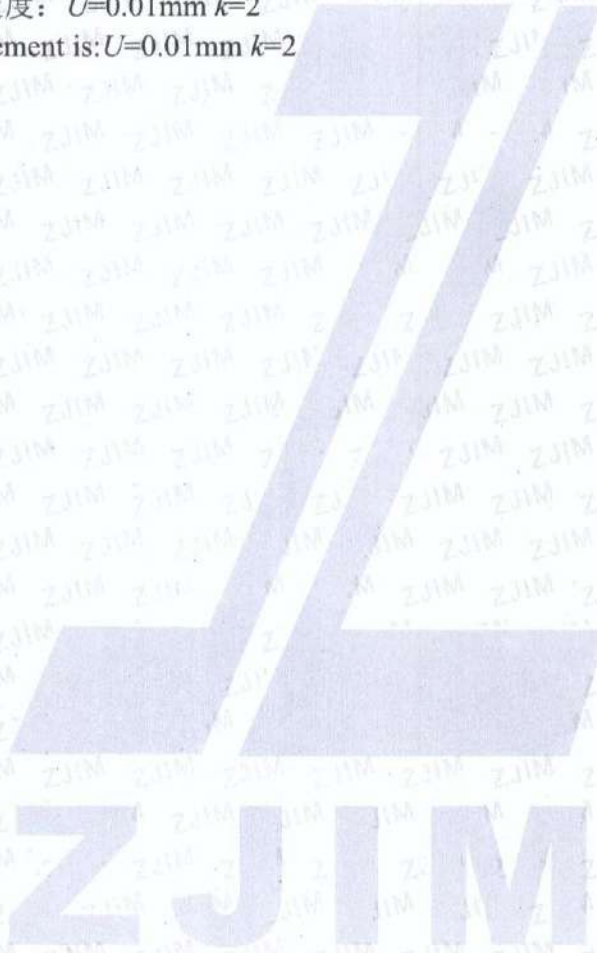
标准位移值 Standard Displacement(m m)	实测值 Measured Displacement(mm)					
	WY-170194 9	WY-170059 6	WY-170057 4	WY-170057 2	WY-170059 5	WY-170057 6
1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.01
2.00	2.00	2.00	2.00	2.01	2.01	2.00
3.00	3.00	3.01	3.00	3.00	3.02	2.98
4.00	4.00	4.01	4.00	4.01	4.01	3.99
5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
10.00	10.00	10.00	10.00	10.01	9.99	10.00
20.00	19.98	20.02	20.00	20.02	19.98	20.01
30.00	29.97	30.01	30.01	30.03	29.98	30.00
40.00	39.99	40.02	40.01	40.04	39.99	40.01
50.00	49.99	50.01	50.01	50.05	49.98	50.00

本次校准结果测量不确定度:  $U=0.01\text{mm } k=2$

The uncertainty of measurement is:  $U=0.01\text{mm } k=2$

以下空白

The end



注: Note

1) 本证书的校准结果仅对所校准的设备有效。

The data are valid only for the instrument(s).

2) 未经本公司批准, 部分采用本证书内容无效。

Partly using this certificate will not be admitted unless allowed by ZJFZ.

3) 中英文对照的证书内容存有歧义时, 以中文文本为准。

If bilingual certificate is ambiguity, the Chinese version shall prevail.

# **ANEXO 7**

**CERTIFICADO DE CALIBRACION  
DE LA GATA HIDRAULICA**





# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

## Facultad de Ingeniería Civil

### LABORATORIO Nº 1 ENSAYO DE MATERIALES "ING. MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA"

Página 1 de 2

## INFORME

Del : Laboratorio Nº1 Ensayo de Materiales  
A : PSV CONSTRUCTORES S.A.  
Asunto : Calibración de GATA HIDRÁULICA  
Expediente Nº : 13-1967  
Recibo Nº : 4148  
Fecha de emisión : 25/06/2013

1.0. DEL ENSAYO : Calibración de un(a) GATA HIDRÁULICA.

2.0. EQUIPO A CALIBRAR :

EQUIPO	GATA HIDRÁULICA
MARCA	SPX POWER TEAM
CAPACIDAD	200 TN.
SERIE	9506

3.0. RESULTADOS :

LECTURA REAL	LECTURA MANOMETRO			LECTURA MANOMETRO	
	TN	1ra Serie	2da Serie		3ra Serie
0	0	0	0	0	0
10	700	700	700	700	700
20	1200	1200	1200	1200	1200
30	1700	1700	1700	1700	1700
40	2200	2200	2250	2217	2217
50	2750	2750	2800	2767	2767
60	3250	3300	3300	3283	3283
70	3800	3800	3800	3800	3800
80	4300	4350	4400	4350	4350
90	4800	4850	4900	4850	4850
100	5400	5400	5400	5400	5400
110	5900	5900	5900	5900	5900
120	6400	6400	6400	6400	6400
130	6900	6900	6900	6900	6900
140	7500	7450	7500	7483	7483
150	8000	8000	8000	8000	8000
160	8500	8500	8550	8517	8517

#### NOTAS:

- 1) Está prohibido reproducir o modificar el informe de ensayo, total o parcialmente, sin la autorización del laboratorio.
- 2) Los resultados de los ensayos solo corresponden a las muestras proporcionadas por el solicitante.

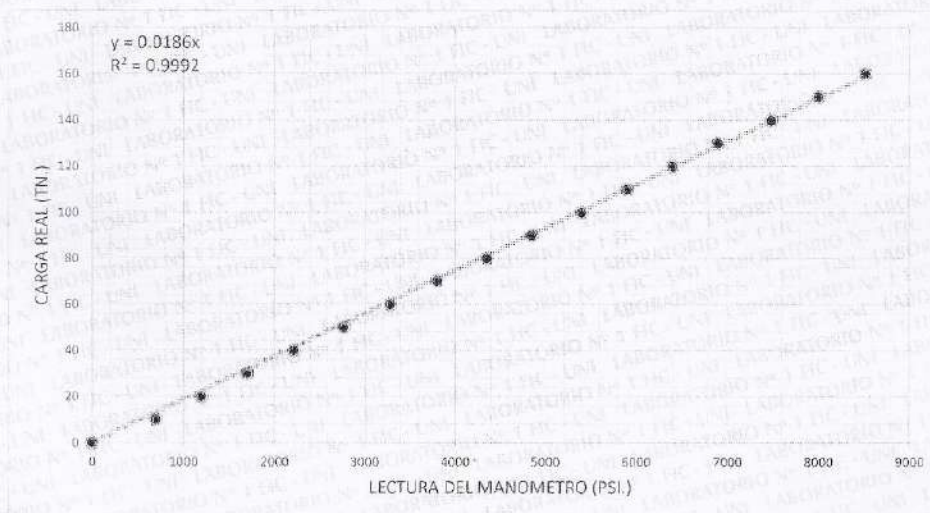
  
Ms. Ing. Ana Torre Carrillo  
Jefe (e) del laboratorio







GRÁFICO DE CALIBRACIÓN DE GATA HIDRÁULICA



Ecuación de la curva de ajuste:

$$y = 0.0186x$$

Donde:

x = Lectura del Manómetro (PSI.)

y = Carga Real (TN.)

4.0. OBSERVACIONES :

- 1) El equipo fue proporcionado e identificado por el solicitante.
- 2) El ajuste lineal es válido en el rango verificado y su empleo es opcional.
- 3) Los resultados son válidos en el momento de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del equipo o a reglamentaciones vigentes.

Hecho por Técnico : Ing. R. Cachay H.  
: Sr. V.G.R. - Sr. L.O.R.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
REPUBLICA DEL PERU  
LABORATORIO N° 1  
ENSAYO DE MATERIALES  
JEFATURA  
Ms. Ing. Ana Torre Carrillo  
Jefe (e) del laboratorio

NOTAS:

- 1) Está prohibido reproducir o modificar el informe de ensayo, total o parcialmente, sin la autorización del laboratorio.
- 2) Los resultados de los ensayos solo corresponden a las muestras proporcionadas por el solicitante.





中国认可  
国际互认  
校准  
CALIBRATION  
CNAS L2865



# 浙江省方正校准有限公司

Zhejiang Province FangZheng Calibration Co., Ltd.

## 校准证书

Calibration Certificate

证书编号: FZJX-2018031783 号

Certificate No.:

委托方

浙江欧感机械制造有限公司

Customer

ZHEJIANG OUGAN MACHINERY CO.LTD

地址

Address of Customer

器具名称

静载荷测试仪 (压力部分)

Name of Instrument

Static load tester (Pressure part)

型号规格

Type/Specification

变: HY6100 仪: RSM-JC5 (C) (0~70) MPa

出厂编号

Serial No.

变: 72386 仪: 20175111200

制造单位

Manufacturer

武汉中岩科技有限公司 SINOROCK TECHNOLOGY

校准日期

Date of Calibration

2018 年 03 月 14 日  
Year month day

发证单位(专用章)

Stamp

校准专用章(1)

批准:

Approved by

缪建

职务:

Function

工程师

校准:

Calibrated by

张楠

核验:

Checked by

张楠



微信公众号

地址:浙江省杭州市下沙路300号

Address: No.300,XiaShaRoad,HangZhou,Zhejiang

传真(Fax): 0571-87850633

电话(Tel): 0571-87855155, 87855133

网址(Website): www.zjufc.com





一、本机构经中国合格评定国家认可委员会评审,符合 CNAS CL-01:2006 (ISO/IEC 17025: 2005)《检测和校准实验室能力的通用要求》的要求,认可证书号: No. CNAS L2865。

二、校准所依据的技术文件(代号、名称):

Calibration Regulation (Code, Name)

参照 JJG 875-2005《数字压力计检定规程》

Reference to JJG 875-2005 <Digital Pressure Gauges>

三、校准环境条件及地点:

Place and environmental conditions of the calibration

地点: 本公司长度(力学)实验室

Place

温度:

Temperature

20.7 °C

相对湿度:

R. H.

56 %

四、本次校准所用主要测量设备:

Equipment used in this calibration

名称 Name	测量范围 Measuring range	不确定度/准确度等级/最大允许误差 Uncertainty/Accuracy/maximum permissible errors	证书编号 Certificate No.	有效期至 Valid date to
数字压力计 Digital precise pressure gauges	(0~60)MPa	0.05 级 Class 0.05	YP20171508J	2018-09-19

本次校准用计量标准器具的量值均可溯源至国家基准。

The value of equipment used in this calibration is traced to those of the national primary standards in the P. R. China.

五、校准结果/说明:

Results of calibration and additional explanation

见下页

Please refer to next page

正校



准专用章

注: Note

1) 本证书的校准结果仅对所校准的设备有效。

The data are valid only for the instrument(s).

2) 未经本公司批准,部分采用本证书内容无效。

Partly using this certificate will not be admitted unless allowed by ZJFZ.

3) 中英文对照的证书内容存有歧义时,以中文文本为准。

If bilingual certificate is ambiguity, the Chinese version shall prevail.

校准结果见下表:

Calibration results are shown in the table below:

标准压力值 Standard pressure value /MPa	示值误差 Error of indication /MPa	扩展不确定度 $U$ ( $k=2$ ) The expanded uncertainty $U$ /MPa ( $k=2$ )
0	+0.08	0.04
15	+0.10	0.04
30	+0.07	0.04
45	+0.10	0.04
60	+0.04	0.04

以下空白

The end

有限公司  
(1)

# **ANEXO 8**

**CERTIFICADO DE CALIBRACION  
DEL MANOMETRO**





# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

**Facultad de Ingeniería Civil**  
**LABORATORIO N° 1 ENSAYO DE MATERIALES**  
**MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA**

Pág. 1 de 2

## INFORME

Del : LABORATORIO N° 1 - ENSAYO DE MATERIALES  
A : **PSV CONSTRUCTORES S.A.**  
Obra : PILOTES PUENTE HUIQUISA  
Ubicación : MACUSANI - PUNO  
Asunto : Calibración de Manometro  
Expediente N° : 11-105 / 11-106  
Recibo N° : 060353  
Fecha : 13/01/11

**1. DEL ENSAYO** : Calibración de un Manometro, marca POWERTEAM N°9089, identificada como Dial #1 de 0 - 10000 PSI y Lect. Min. 100 PSI.

El equipo fue proporcionado e identificado por el cliente.

**2. DEL EQUIPO A CALIBRAR :**

### MANOMETRO

MARCA : POWER TEAM # 9089.  
Serial : 9089  
Piston de Carga : N°1  
Capacidad : 10 000 PSI

**3. RESULTADOS** : Los resultados de la verificación se muestran en la siguiente Tabla y su respectiva curva.

CARGA DIAL (PSI)	LECTURA EQUIPO PATRON (kg)			LECTURA PROMEDIO (kg)
	I	II	III	
1000	19800	19900	20100	19933
2000	38900	35500	39300	37900
3000	57900	58000	58200	58033
4000	77200	77100	77300	77200
5000	96500	96000	96000	96167

V.H.J.







# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

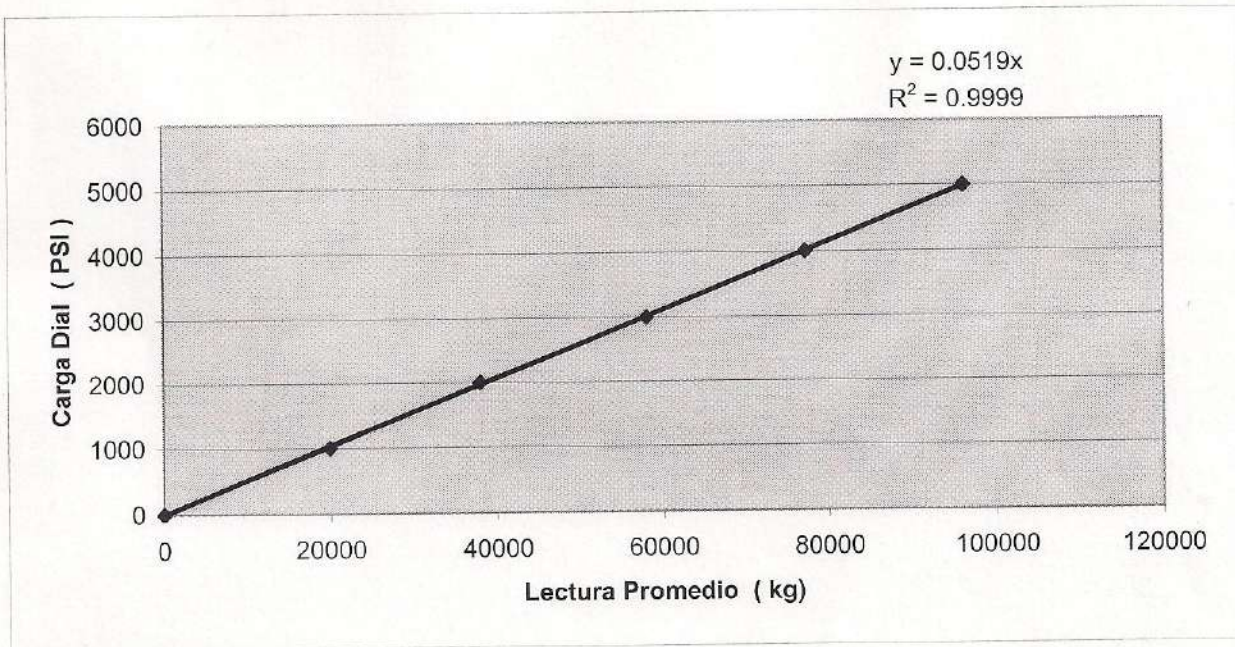
## Facultad de Ingeniería Civil

LABORATORIO N° 1 ENSAYO DE MATERIALES

MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA

Pág. 2 de 2

GRAFICO DE CALIBRACION DE MANOMETRO



Ecuación de la curva de ajuste:  $y = 0.0519x$

Donde :  $x =$  Lectura Promedio (kg)  
 $y =$  Carga Dial (PSI)

NOTA IMPORTANTE : El ajuste lineal es válido en el rango verificado y su empleo es opcional

HECHO POR : Ing. A. Torre C.  
TECNICO : Sr. V.G.

V.H.J.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
LABORATORIO  
REPUBLICA DEL PERU  
ENSAYO DE MATERIALES  
JEFATURA  
Ing. ISABEL MOROMI NAKATA  
Jefe ( e )





# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

## Facultad de Ingeniería Civil

LABORATORIO N° 1 ENSAYO DE MATERIALES

MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA

Pág. 1 de 2

### INFORME

Del : LABORATORIO N° 1 - ENSAYO DE MATERIALES  
A : **PSV CONSTRUCTORES S.A.**  
Obra : PILOTES PUENTE HUIQUISA  
Ubicación : MACUSANI - PUNO  
Asunto : Calibración de Manometro  
Expediente N° : 11-105 / 11-106  
Recibo N° : 060353  
Fecha : 13/01/11

**1. DEL ENSAYO** : Calibración de un Manometro, marca POWERTEAM N°9089, identificada como Dial #2 de 0 - 10000 PSI y Lect. Min. 100 PSI.

El equipo fue proporcionado e identificado por el cliente.

**2. DEL EQUIPO A CALIBRAR :**

#### MANOMETRO

MARCA : POWER TEAM # 9089.  
Serial : 9089  
Piston de Carga : N°2  
Capacidad : 10 000 PSI

**3. RESULTADOS** : Los resultados de la verificación se muestran en la siguiente Tabla y su respectiva curva.

CARGA DIAL (PSI)	LECTURA EQUIPO PATRON ( kg )			LECTURA PROMEDIO ( kg)
	I	II	III	
1000	21500	20900	20700	21033
2000	40100	39700	39800	39867
3000	58800	59000	58500	58767
4000	78600	78500	78100	78400
5000	97800	98000	97500	97767

V.H.J.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
LABORATORIO  
REPUBLICA DEL PERU  
ENSAYO DE MATERIALES  
Ing. ISABEL MOROMI NAKATA  
JEFATURA Jefe ( e )



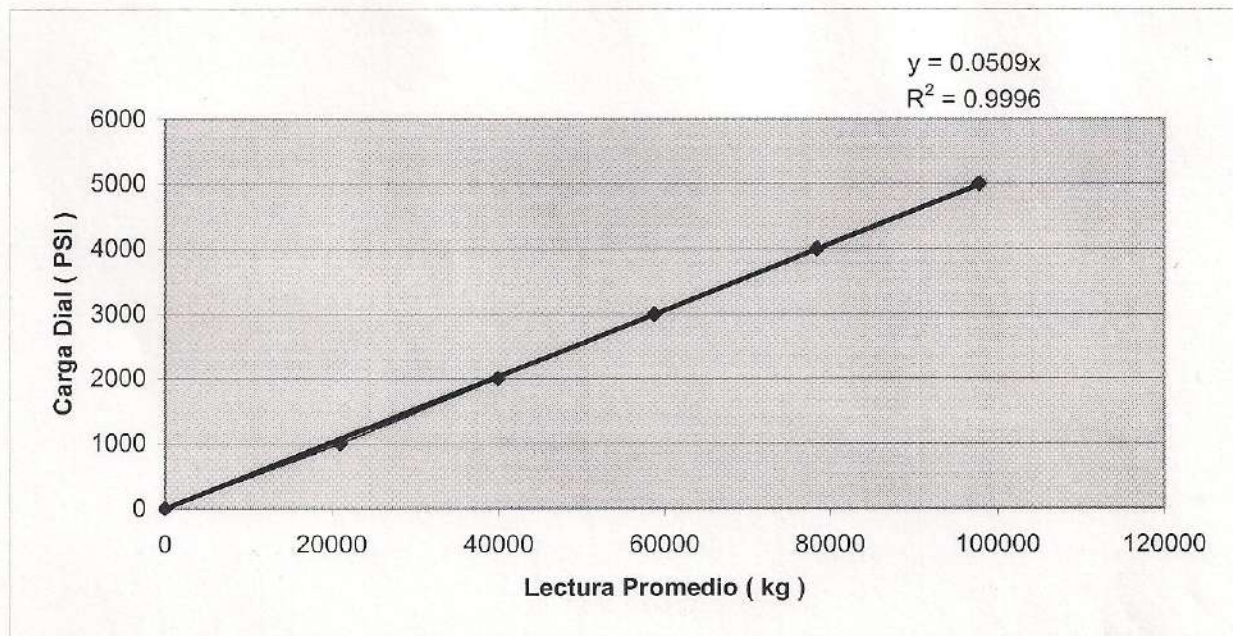


# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil  
LABORATORIO N° 1 ENSAYO DE MATERIALES  
MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA

Pág. 2 de 2

GRAFICO DE CALIBRACION DE MANOMETRO



Ecuación de la curva de ajuste:  $y = 0.0509x$

Donde :  $x =$  Lectura Promedio ( kg )  
 $y =$  Carga Dial ( PSI )

NOTA IMPORTANTE : El ajuste lineal es válido en el rango verificado y su empleo es opcional

HECHO POR : Ing. A. Torre C.  
TECNICO : Sr. V.G.

V.H.J.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
LABORATORIO  
REPUBLICA DEL PERÚ  
ENSAYO DE MATERIALES  
JEFATURA  
Ing. ISABEL MOROMI NAKATA  
Jefe ( e )





中国认可  
国际互认  
校准  
CALIBRATION  
CNAS L2865



# 浙江省方正校准有限公司

Zhejiang Province FangZheng Calibration Co., Ltd.

## 校准证书

Calibration Certificate

证书编号: FZJX-2017120242 号

Certificate No.:

委托方

浙江欧感机械制造有限公司

Customer

ZHEJIANG OUGAN MACHINERY CO.LTD

地址

/

Address of Customer

器具名称

耐震精密压力表

Name of Instrument

Shock-resistant precise pressure gauges

型号规格

(0~60) MPa

Type/Specification

出厂编号

HC67611808536

Serial No.

制造单位

西安自动化仪表一厂

Manufacturer

XI'AN AUTOMATION INSTRUMENT NO.1 FACTORY

校准日期

Date of Calibration

2017 年 12 月 04 日  
Year month day

发证单位(专用章)

Stamp

校准专用章(1)

批准:

Approved by

缪建

职务:

Function

工程师

校准:

Calibrated by

张楠

核验:

Checked by

李志俊



微信公众号

地址:浙江省杭州市下沙路 300 号

Address: No.300,XiaShaRoad,HangZhou,Zhejiang

传真(Fax): 0571-87850633

电话(Tel): 0571-87855155, 87855133

网址(Website): www.zjufc.com





一、本机构经中国合格评定国家认可委员会评审,符合 CNAS CL-01:2006 (ISO/IEC 17025:2005)《检测和校准实验室能力的通用要求》的要求,认可证书号:No. CNAS L2865。

二、校准所依据的技术文件(代号、名称):

Calibration Regulation (Code、Name)

参照 JJG 49-2013《弹性元件式精密压力表和真空表检定规程》

Reference to JJG 49-2013 <Elastic Element Precise Pressure Gauges and Vacuum Gauges>

三、校准环境条件及地点:

Place and environmental conditions of the calibration

地点: 本公司长度(力学)实验室

Place

温度:

Temperature

20.3 °C

相对湿度:

R. H.

60 %

四、本次校准所用主要测量设备:

Equipment used in this calibration

名称 Name	测量范围 Measuring range	不确定度/准确度等级/最大允许误差 Uncertainty/Accuracy/maximum permissible errors	证书编号 Certificate No.	有效期至 Valid date to
数字压力计 Digital precise pressure gauges	(0~60)MPa	0.05 级 Class 0.05	YP20171508J	2018-09-19

本次校准用计量标准器具的量值均可溯源至国家基准。

The value of equipment used in this calibration is traced to those of the national primary standards in the P. R. China.

五、校准结果/说明:

Results of calibration and additional explanation

见下页

Please refer to next page

正校核



佳专用章

注: Note

1) 本证书的校准结果仅对所校准的设备有效。

The data are valid only for the instrument(s).

2) 未经本公司批准,部分采用本证书内容无效。

Partly using this certificate will not be admitted unless allowed by ZJFZ.

3) 中英文对照的证书内容存有歧义时,以中文文本为准。

If bilingual certificate is ambiguity, the Chinese version shall prevail.



校准结果见下表:

Calibration results are shown in the table below:

标准压力值 Standard pressure value /MPa	示值误差 Error of indication /MPa	扩展不确定度 $U$ The expanded uncertainty $U$ ( $k=2$ ) /MPa
0	0.00	0.08
5	-0.10	0.08
10	-0.10	0.08
15	-0.10	0.08
20	-0.05	0.08
25	-0.15	0.08
30	-0.10	0.08
35	-0.15	0.08
40	-0.10	0.08
45	-0.15	0.08
50	-0.10	0.08
55	-0.15	0.08
60	-0.10	0.08

以下空白

The end

