

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**COMPARACIÓN ENTRE PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA Y  
PRUEBAS DE CARGA DINÁMICA PARA PILOTES HINCADOS EN  
EL PERÚ**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
CON MENCIÓN EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA**

ELABORADO POR

**JULIO RICARDO LARA LLACAS**

ASESOR

**Dr. JORGE LUIS CÁRDENAS GUILLÉN**

LIMA-PERÚ

2014

COMPARACIÓN ENTRE PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA Y PRUEBAS  
DE CARGA DINÁMICA PARA PILOTES HINCADOS EN EL PERÚ

Julio Ricardo Lara Llacas

Presentado a la Sección de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil en  
cumplimiento parcial de los requerimientos para el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA  
DE LA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

2014

Autor : Julio Ricardo Lara Llacas

Recomendado : Dr. Jorge Luis Cárdenas Guillén  
Asesor de la Tesis

Aceptado por : Dr. Jorge Elias Alva Hurtado  
Jefe de la Sección de Posgrado

Es propiedad intelectual del autor.

el autor autoriza a la UNI-FIC a reproducir la tesis en su totalidad o en partes.

## **DEDICATORIA**

A mi esposa, el soporte de mi vida.

## **RESUMEN**

En la presente tesis se muestra la comparación de los resultados de ensayos estáticos y dinámicos ejecutados a un mismo o similar pilote hincado en el territorio peruano para establecer una correlación en base al comportamiento Carga Tipo Estática vs. Deformación a nivel del cabezal del pilote.

La tesis presenta aspectos generales sobre diseño, construcción y control de calidad para pilotes, haciendo énfasis en el procedimiento, resultados y su interpretación de pruebas de carga estática y dinámica. Los casos de estudio son ubicados referencialmente en las tres regiones del Perú: Iquitos (selva), Rioja (sierra) y Chimbote (costa).

Un aspecto importante de la presente tesis es la normativa y las recomendaciones referentes a los parámetros de control para pruebas de carga en función al método de diseño utilizado: Método de Esfuerzos Admisibles (ASD) ó Método de Estado Límite de Esfuerzos (LRFD).

Con la presente investigación se establece información necesaria para un mayor entendimiento de los ensayos de control de calidad en pilotes y su implicancia para la planificación y ejecución de proyectos en el ámbito nacional.

## **ABSTRACT**

In this thesis comparing the results of static and dynamic tests executed a same or similar pile driving in Peruvian territory to establish a correlation based on the behavior of Static Type Load vs. Deformation at the pile head.

The thesis presents general aspects of design, construction and quality control for piles, emphasizing the procedure, results and interpretation of static and dynamic load testing. The case studies are referentially located in the three regions of Perú: Iquitos ( jungle) , Rioja (mountain) and Chimbote (coast).

As a preliminary and important aspect is developed regulations and recommendations concerning the control parameters for load testing (selection required load and appropriate safety factor) according to the design method used: Allowable Strength Design (ASD) or Load Resistance Factor Design (LRFD).

With this research is established information needed for a better understanding of the quality control tests on piles and their implications for planning and execution of projects at the national level.

---

## INDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>v</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>INDICE DE TABLAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>CAPITULO I: INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivo de la Tesis.....	3
1.3 Contenido de la Tesis.....	3
<b>CAPITULO II: ASPECTOS GENERALES.....</b>	<b>5</b>
2.1 Cimentaciones Piloteadas.....	5
2.2 Pilotes Hincados o Desplazantes.....	10
2.3 Diseño y Verificación de Cimentaciones Piloteadas.....	15
<b>CAPITULO III: METODOLOGIA DE ENSAYOS.....</b>	<b>68</b>
3.1 Pruebas de Carga Estática para Pilotes.....	70
3.2 Pruebas de Carga Dinámica para Pilotes.....	77
<b>CAPITULO IV: CASOS ESTUDIADOS.....</b>	<b>84</b>
4.1 CASO I: Ampliación de Central Termoeléctrica en Iquitos – Loreto – Perú.....	85
4.2 CASO II: Ampliación de Planta de Cemento en Rioja – San Martín – Perú.....	97
4.3 CASO III: Construcción de Centro Comercial Administrativo en Chimbote – Ancash– Perú.....	107

---

<b>CAPITULO V: COMPARATIVA Y DISCUSION DE RESULTADOS.....</b>	<b>126</b>
5.1 Evaluación de las Condiciones Geotécnicas y Pilotes de los Casos Estudiados.....	126
5.2 Comportamiento Esfuerzo-Deformación entre Casos de Estudios.....	128
5.3 Comparativos de Capacidades de Carga Ultima entre PDA y PCE.....	135
5.4 Impacto en Resultados de PDA en función del tiempo de reposo para Suelo Cohesivo (Caso I).....	140
5.5 Esfuerzos Dinámicos y Estáticos en Ensayos de Carga.....	141
5.6 Comparativo de Capacidades de Carga Ultima de Ensayos y Capacidades de Carga Requeridas por cada proyecto.....	143
5.7 Capacidad de Carga de Pilotes mediante Ensayos de Carga para casos de pérdida de Aporte por Fricción.....	144
<b>CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>147</b>
6.1 Conclusiones.....	147
6.2 Recomendaciones.....	150
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>152</b>
<b>ANEXO A: Lecturas obtenidas en PCE- Compresión en Caso I (Iquitos).....</b>	<b>155</b>
<b>ANEXO B: Lecturas obtenidas en PCE- Compresión en Caso II (Rioja).....</b>	<b>158</b>
<b>ANEXO C: Informe Final Complementario-ZER Geosystem Perú SAC-Pruebas de Carga - Caso III (Chimbote).....</b>	<b>162</b>

## INDICE DE FIGURAS

### CAPITULO II

Figura 2.1	Transferencia Axial de Cargas en una Cimentación Profunda dentro del suelo.....	6
Figura 2.2	Martillos para Pilotes de Hincado Autosuficiente.....	13
Figura 2.3	Esquema de Martillo Diesel DELMAG D-22.....	14
Figura 2.4	Curvas para determinación de Factor de Adherencia para pilotes hincados en suelos No Cohesivos (AASHTO, 2010).....	21
Figura 2.5	Curvas $\beta$ vs. OCR para pilotes de desplazamiento (AASHTO, 2010).....	22
Figura 2.6	Curva de Resultados de Ensayos de Carga de Pilotes Tubulares Hincados para la determinación del valor $\lambda$ (AASHTO, 2010).....	23
Figura 2.7	Factores de Corrección para resistencia friccional, $K_S$ y $K_C$ (AASHTO, 2010).....	26
Figura 2.8	Curva para obtención de Coeficiente de Capacidad de Carga (AASHTO, 2010).....	28
Figura 2.9	Transmisión de esfuerzos considerando la naturaleza elástica del pilote y visco elástica del suelo.....	46
Figura 2.30	Modelo Numérico usado en el Análisis de la Ecuación de Onda.....	48
Figura 2.31	Análisis de la Ecuación de Onda Mediante Incrementos De Tiempo.....	49
Figura 2.32	Fuerzas y Desplazamientos de Elementos.....	51
Figura 2.33	Deformación Plástica del Suelo.....	55
Figura 2.34	Idealización del Sistema Amortiguador – Martillo – Pilote.....	58
Figura 2.35	Diagrama Fuerza vs Desplazamiento para el Amortiguador Superior e Inferior.....	60
Figura 2.36	Celda de Osteberg y Equipo Relacionado para Ensayos Estáticos en Pilotes.....	64
Figura 2.37	Habilitación de una celda Osterberg.....	64
Figura 2.38	Esquema del Mecanismo Hidráulico Statnamic .....	65



---

Figura 2.39	Vista del Procedimiento del Ensayo Statnamic .....	66
Figura 2.40	Gráfica Comparativa de Fuerza (tn) vs. Tiempo (ms) entre Ensayo Estático y Statnamic (Lara J., 2007) .....	67

### **CAPITULO III**

Figura 3.1	Curva Carga vs. Deformación para Carga de Ensayo 220 ton en Rioja, San Martín, Perú .....	71
Figura 3.2	Esquema de Prueba de Carga Estática a Compresión con Pilotes de Reacción .....	72
Figura 3.3	PCE a Compresión con Pilotes de Reacción para Carga de Ensayo 240 ton en Rioja, San Martín, Perú .....	73
Figura 3.4	PCE a Compresión con Contrapeso para Carga de Ensayo 70 ton en Chimbote, Ancash, Perú .....	74
Figura 3.5	PCE a Compresión con Contrapeso + Pilotes de Reacción para Carga de Ensayo 80 ton en Iquitos, Loreto, Perú .....	74
Figura 3.6	Procedimiento de Prueba de Carga Estática (PCE) a Compresión con Pilotes de Reacción.....	75
Figura 3.7	Instalación de Sensores PDA - Proyecto Marine Trestle para Southern, Perú.....	79
Figura 3.8	Curvas Fuerza y Velocidad vs. Tiempo en un Pilote.....	81

### **CAPITULO IV**

Figura 4.1	Plano de Ubicación de los casos estudiados en el territorio peruano.....	84
Figura 4.2	Curvas Carga Aplicada vs Deformación Total PCE Compresión– Iquitos.....	90
Figura 4.3	Registro Fotográfico del Proceso de PCE Compresión - Iquitos.....	91
Figura 4.4	Curvas Carga vs Deformación Total calculada por el PDA – Iquitos.....	95
Figura 4.5	Curvas Carga Aplicada vs Deformación en función del tiempo de relación del Suelo – Iquitos.....	96
Figura 4.6	Registro Fotográfico del Proceso de Prueba de Carga Dinámica - Iquitos.....	97
Figura 4.7	Esquema de Sistema de Ensayo PCE Compresión – Rioja.....	102

---

Figura 4.8	Curvas Carga Aplicada vs Deformación Total PCE Compresión– Rioja.....	103
Figura 4.9	Registro Fotográfico del Proceso de PCE Compresión - Rioja.....	104
Figura 4.10	Curvas Carga Aplicada vs Deformación Total calculada por PDA – Rioja.....	106
Figura 4.11	Registro Fotográfico del Proceso de Prueba de Carga Dinámica - Rioja.....	107
Figura 4.12	Ubicación del Proyecto-Chimbote.....	108
Figura 4.13	Ubicación de Exploración Geotécnica-Geofísica Bloque A1 - Chimbote .....	109
Figura 4.14	Ubicación de Exploración Geotécnica-Geofísica Bloque D - Chimbote .....	115
Figura 4.15	Ubicación de Exploración Geotécnica-Geofísica Bloque A2 – Chimbote.....	117
Figura 4.16	Vista de Sistema de Reacción de PCE - Chimbote.....	120
Figura 4.17	Curvas Carga Aplicada vs Deformación Total PCE Compresión – Chimbote .....	121
Figura 4.18	Registro Fotográfico del Proceso de PCE Compresión - Chimbote.....	121
Figura 4.19	Curvas Carga Aplicada vs Deformación Total calculada por PDA – Chimbote.....	124
Figura 4.20	Registro Fotográfico del Proceso de Prueba de Carga Dinámica - Chimbote.....	125

## **CAPITULO V**

Figura 5.1	Comportamiento de la Curva Carga vs Desplazamiento en función del tipo de suelo según Coduto, D. (2001).....	129
Figura 5.2	Curva Carga y Descarga vs. Deformación de resultados promedio de PCE para cada caso estudiado.....	129
Figura 5.3	Curva Carga y Descarga vs. Deformación de resultados promedio de PDA para cada caso estudiado.....	131
Figura 5.4	Curva Carga y Descarga vs. Deformación de resultados promedio entre PCE y PDA para Caso I – Iquitos.....	132

---

Figura 5.5	Curva Carga y Descarga vs. Deformación de resultados promedio entre PCE y PDA para Caso II – Rioja.....	133
Figura 5.6	Curva Carga y Descarga vs. Deformación de resultados promedio entre PCE y PDA para Caso III – Chimbote.....	134
Figura 5.7	Resultado de Estudio de Correlación elaborado por Goble (1980).....	135
Figura 5.8	Resultado de Estudio de Correlación elaborado por Likins (1996).....	136
Figura 5.9	Resultado de Estudio de Correlación de compilación de información realizada por Likins D.....	137
Figura 5.10	Resultado de Correlación de Casos Estudiados I & III.....	138
Figura 5.11	Esquema del aporte Dinámico y Estático en la Carga Total Aplicada durante un PDA.....	143

---

## INDICE DE TABLAS

### CAPITULO II

Tabla 2.1	Factor de Seguridad en Pilotes Hincados para Cargas por el Método de Esfuerzos Admisibles - ASD (Likins G., 2010).....	17
Tabla 2.2	Factor de Reducción en Pilotes Hincados para Cargas por el Método de Estado Limite – LRFD (Likins G., 2010).....	18
Tabla 2.3	Relación de Valores Típicos para Eficiencia del Martillo (Coduto D., 2001).....	32
Tabla 2.4	Relación de Valores Típicos para Coeficiente de Restitución (Coduto D., 2001).....	32
Tabla 2.5	Relación de Valores Típicos para Coeficiente de Formula Hiley (Coduto D., 2001).....	35
Tabla 2.6	Valores de Módulos de Elasticidad para Diversos Materiales usados como Amortiguador (Bowles J., 1997).....	40
Tabla 2.7	Constante de Amortiguamiento del Suelo en la Punta del Pilote (Bowles J., 1997).....	42
Tabla 2.8	Deformación Máxima del Suelo para ciertos Tipos de Suelo (Bowles J., 1997).....	42
Tabla 2.9	Intervalo de Tiempo en función al material del pilote.....	61
Tabla 2.10	Modulo de Elasticidad de Amortiguadores en Cabezal de Impacto (Bowles J., 1997).....	61
Tabla 2.11	Desplazamiento Dinámico (quake) y Amortiguamiento (damping) del Suelo (Bowles J., 1997).....	62

### CAPITULO IV

Tabla 4.1	Resultados de SPT del Sondaje P-01 - Iquitos.....	85
Tabla 4.2	Resumen de Resultados de Ensayos de Laboratorio – Iquitos.....	86
Tabla 4.3	Resumen de Ensayo de Refracción Sísmica – Iquitos.....	86
Tabla 4.4	Resumen de Ensayo de Línea Geofísica (Ondas S) – Iquitos.....	87
Tabla 4.5	Resumen de Análisis Químico del Suelo – Iquitos .....	87

---

Tabla 4.6	Capacidad Admisible para Pilotes de Acero Tubular – Iquitos.....	88
Tabla 4.7	Características de los Pilotes Ensayados PCE Compresión – Iquitos.....	89
Tabla 4.8	Características de los Pilotes Ensayados PDA – Iquitos.....	91
Tabla 4.9	Resultados de Análisis CAPWAP – Iquitos .....	92
Tabla 4.10	Capacidad de Carga Máxima – Iquitos.....	93
Tabla 4.11	Esfuerzos durante el ensayo dinámico – Iquitos.....	94
Tabla 4.12	Resultados de ensayo de penetración estándar (SPT) y clasificación de suelos (SUCS) – Rioja.....	98
Tabla 4.13	Resultados de ensayo Cono Peck (CP) – Rioja .....	99
Tabla 4.14	Valores Equivalentes N a partir del ensayo de Cono Peck para los 26 a 33m de profundidad– Rioja.....	100
Tabla 4.15	Capacidad Admisible para Pilotes Cuadrado C°A°– Rioja.....	100
Tabla 4.16	Características de los Pilotes Ensayados PCE Compresión – Rioja.....	102
Tabla 4.17	Características de los Pilotes Ensayados PDA – Rioja.....	104
Tabla 4.18	Resultados de Análisis CAPWAP – Rioja.....	105
Tabla 4.19	Capacidad de Carga Máxima – Rioja .....	105
Tabla 4.20	Esfuerzos durante el ensayo dinámico – Rioja.....	106
Tabla 4.21	Datos de Exploración SPT-01 – Chimbote.....	110
Tabla 4.22	Datos de Exploración SPT-01N – Chimbote.....	110
Tabla 4.23	Datos de Exploración SPT-02N – Chimbote.....	111
Tabla 4.24	Datos de Exploración SPT-03N – Chimbote.....	112
Tabla 4.25	Datos de Exploración SPT-04N - Chimbote.....	113
Tabla 4.26	Datos de Exploración SPT-05N - Chimbote.....	113
Tabla 4.27	Datos de Exploración SPT-02 - Chimbote.....	115
Tabla 4.28	Datos de Exploración SPT-03 - Chimbote.....	118
Tabla 4.29	Características de los Pilotes Ensayados PCE Compresión – Rioja.....	120
Tabla 4.30	Características de los Pilotes Ensayados PDA – Chimbote.....	122
Tabla 4.31	Resultados de Análisis CAPWAP – Chimbote.....	123
Tabla 4.32	Capacidad de Carga Máxima – Chimbote .....	123
Tabla 4.33	Esfuerzos durante el ensayo dinámico – Chimbote.....	124

## CAPITULO V

Tabla 5.1	Resumen de Características Geotécnicas de los Casos Estudiados.....	127
-----------	---	-----

---

---

Tabla 5.2	Resultados de Correlación de Casos Estudiados I & III.....	138
Tabla 5.3	Resumen de Resultados de Carga Ultima de Pilotes Ensayados durante la Instalación para Caso I (Ver Figura 4.5).....	140
Tabla 5.4	Resumen de Resultados de Carga Ultima de Pilotes Ensayados en Rehinca para Caso I (Ver Figura 4.6).....	141
Tabla 5.5	Valores de Carga y Desplazamiento obtenido de PDA (CAPWAP / CASE) para Caso I (Iquitos).....	142
Tabla 5.6	Valores de Carga y Desplazamiento obtenido de PDA (CAPWAP / CASE) para Caso III (Chimbote).....	142
Tabla 5.7	Relación de la Capacidad Admisible Requerida y la Capacidad de Carga Ultima obtenida de PCE y PDA.....	143
Tabla 5.8	Aporte por Fricción y por Punta de Resultados de PDA para Caso III.....	145

#### **ANEXO A**

Tabla A.1	Lecturas obtenidas en PCE- Compresión en Pilote PP1 Engine Hall Motor – Iquitos.....	155
Tabla A.2	Lecturas obtenidas en PCE- Compresión en Pilote PP2 STACK – Iquitos.....	156

#### **ANEXO B**

Tabla B.1	Lecturas obtenidas en PCE- Compresión en Pilote P85 Silos – Rioja.....	158
Tabla B.2	Lecturas obtenidas en PCE- Compresión en Pilote P49 HVC Nro.4 – Rioja.....	159
Tabla B.3	Lecturas obtenidas en PCE- Compresión en Pilote Z12-P29 Secador Nro.2 – Rioja.....	160

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCION

### 1.1 ANTECEDENTES

Las cimentaciones con pilotes son utilizados cuando los estratos superficiales del suelo no garantizan un comportamiento adecuado, en términos de capacidad de soporte para las superestructuras proyectadas.

Entre los distintos tipos de pilotes se encuentran el de “largo desplazamiento o pilotes de desplazamiento” (clasificación por el tipo de efecto en el terreno durante su instalación), entre los cuales se encuentran los pilotes hincados.

Debido a la diversidad de suelos y tipos de proyectos en el Perú es necesario en algunos casos que se requieran la utilización de cimentaciones con pilotes, una gran parte de estos proyectos utilizan pilotes hincados, donde se hace necesario verificar su comportamiento en lugar. De allí la importancia de la realización de pruebas de carga in-situ, por ser este el método con menor incertidumbre en la determinación de las capacidades de soporte del pilote.

De acuerdo a la normativa internacional como el AASHTO (2010), FHWA (1998), NBR-6122 Brasil (2010), CTE España (2006), DGRS-R-024 Rep. Dominicana (2006), RSR-10 Colombia (2010), MDC México (2001), FDC Hong Kong (2006), EUROCODE EN 1997-1 (2004); donde se regulan su jurisdicción y se fomentan la utilización de pruebas de carga in-situ, con el objetivo de determinar la capacidad última de la interacción suelo-pilote. Estas pruebas, en el caso de pilotes, pueden ser del tipo estáticas y/o dinámicas.

Likins (Likins, G., 2003 y 2010) desarrolló una interpretación de la normativa internacional, donde consideró que el valor real, o con menos incertidumbre, de la capacidad última de un pilote puede ser obtenido por medio de pruebas de carga in-situ del tipo estáticas y/o dinámicas.

---

Basado en una recopilación de información de ensayos de carga dinámica y estática, entre 1980 al 2000 en diferentes tipos de suelo y de pilotes, Likins (Likins, G., 2004) propuso una correlación de resistencia entre ambos ensayos cuyo valor varía entre 0.86 a 0.99.

En el ámbito nacional, la normativa peruana que regula el diseño y ejecución de pilotes son la Norma Técnica de Edificaciones E.050 (2006) y el Manual de Diseño de Puentes (2003). Cabe resaltar que estas normas no especifican los tipos de pruebas de carga a ser realizados para pilotes, y únicamente la norma E.050 hace mención a prueba de carga del tipo estática a pesar que a nivel internacional este procedimiento es solo una opción.

De los documentos antes mencionados con respecto a otros países, se puede inferir que la normativa peruana es limitada y poco específica en el tema de control de calidad y verificación de diseño de pilotes, por lo tanto, en los diversos tipos de proyectos existen incertidumbre en la planificación y ejecución de ensayos de carga en pilotes.

Los expedientes técnicos de los proyectos públicos, y en mayor parte en privados, no manejan correctamente la utilización de pruebas de carga en pilotes por el desconocimiento de la materia, su poca referencia técnica en el país y por el impacto económico al proyecto.

Cabe mencionar que en el Perú existe otra problemática en la materia en referencia, los expedientes técnicos de proyectos de construcción, informes técnicos, publicaciones, tesis o investigaciones están orientadas a la metodología del diseño de pilotes (Peña, 1988; Bermúdez, 1994; Ruiz, 1997; Miranda, 2002; Lujan, 2003) por lo tanto son escasos la información sobre la ejecución de ensayos estáticos o dinámicos dentro del territorio nacional, que además son presentados de forma aislada o independientes y no correlacionada (Alva., 1994; Lara., 2007; Lujan, 2010; Flores, 2013). En tal sentido, es importante establecer estudios integrales donde se establezcan analogías entre los ensayos estáticos y dinámicos para una mejor toma de decisiones en cuanto a determinar la capacidad real de soporte del pilote, motivo por el cual la presente tesis enfoca su objetivo.

Por lo tanto, la presente tesis para tratar la problemática antes mencionada, utiliza la información de ensayos de carga axial en pilotes de los siguientes proyectos: Ampliación de Central Termoeléctrica en Iquitos (2013); Ampliación de Planta de Cementos en Rioja (2011), y Construcción de Centro Comercial en Chimbote (2011-2012); donde se han ejecutado ensayos de carga a pilotes del tipo tanto estático como dinámico.



## **1.2 OBJETIVO DE LA TESIS**

### **Objetivo Principal**

- Comparar los resultados entre ensayos estáticos y dinámicos ejecutados en un mismo pilote o de similares características para establecer una correlación entre estos. Este comparativo estaría enmarcado bajo el comportamiento “Carga versus Deformación”.

### **Objetivos Secundarios**

- Generar información técnica que sirva como base para la actualización de la normativa peruana.
- Difundir como herramienta de control de calidad en pilotes los ensayos de carga dinámicos.
- Relacionar los resultados del presente análisis comparativo en el Perú con respecto a otros estudios realizados internacionalmente.

## **1.3 CONTENIDO DE LA TESIS**

Para el propósito de esta investigación, se desarrollaran seis capítulos donde se evaluará los ensayos de pilotes hincados en los proyectos peruanos: Ampliación de Central Termoeléctrica en Iquitos (2013); Ampliación de Planta de Cementos en Rioja (2011), y Construcción de Centro Comercial en Chimbote (2011-2012).

En el Capítulo I se da a conocer los antecedentes, los objetivos y la estructuración de la presente tesis.

El Capítulo II presenta los conceptos generales sobre cimentaciones con pilotes, metodologías de diseño, procesos constructivos y controles de calidad son detallados los procesos o temas relacionados con pilotes hincados.

En el Capítulo III se describe la ejecución de las pruebas de carga estática y dinámica para pilotes mencionado en anteriores capítulos.

El Capítulo IV presenta la descripción de los casos estudiados. Se relata la tipología de suelos de las zonas base de estudio, los tipos de pilotes involucrados en dichos proyectos y los resultados de los ensayos de carga.

Posteriormente en el Capítulo V, se realiza un análisis, discusión y correlación de los valores obtenidos en dichos ensayos y otros obtenidos en el ámbito nacional o internacional.

Finalmente, en el Capítulo VI se presenta las conclusiones y recomendaciones obtenidas del desarrollo de la presente tesis.

## CAPÍTULO II

### ASPECTOS GENERALES

#### 2.1 CIMENTACIONES PILOTEADAS

Los pilotes son elementos estructurales que pueden ser de madera, concreto y/o acero, usados para transmitir cargas a capas del subsuelo de mayor profundidad y con capacidad de carga necesaria para el correcto funcionamiento de las estructuras proyectadas.

Esta transferencia puede ser por distribución vertical de la carga por fricción y por punta o por la combinación de éstos. Una distribución vertical de la carga se da cuando la capacidad de un pilote es principalmente igual a la resistencia al corte que se genera del rozamiento y/o la adherencia a lo largo del pilote con el suelo. Por otro lado, la transmisión por punta se da cuando la capacidad de carga es generada por la roca o suelo que se encuentra cerca de la punta del pilote.

Existe una gran variedad de métodos para la instalación de pilotes. En esta investigación se centrará en Pilotes Hincados, el mismo que se realiza por el impulso de una sucesión de golpes fijos en la superficie superior del pilote. El golpe puede aplicarse usando un martillo hincapilotes, que contiene un martinete, o con un equipo vibrador.

##### 2.1.1 Funcionalidad de Cimentaciones Profundas con Pilotes

El pilote es un elemento estructural que forma parte de la infraestructura de la construcción cuyas funciones principales son las siguientes (Bowles, J., 1997):

- a. Transferir cargas de la superestructura y del resto de la infraestructura a través de agua o de suelo de baja resistencia, a estratos de suelos resistentes ubicados a mayor profundidad, que tengan la capacidad de soporte necesaria para tolerar la estructura. De esta forma el pilote se comporta como una extensión de la columna. Estos estratos inferiores pueden ser rocas, arcillas duras o suelos de baja compresibilidad (Pilote de Punta, mostrado en la Figura 2.1).
- b. Transferir o repartir la carga sobre un suelo relativamente suelto a través de la fricción de superficie del pilote y el suelo (pilote de fricción), que a su vez se puede

sub-dividir, según Terzaghi, en pilotes de fricción en suelos de grano grueso muy permeable y pilote de fricción en suelo de grano fino o de baja permeabilidad. En la naturaleza es difícil encontrar estratos de suelos homogéneos por lo cual no existe un límite real entre estas categorías.

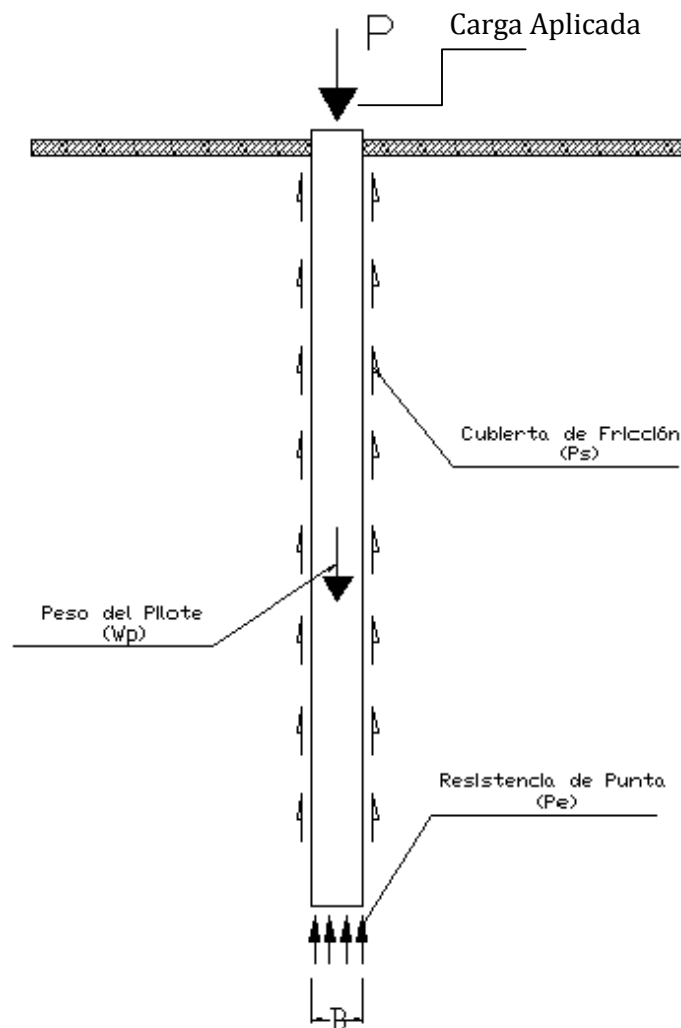


Figura 2.1: Transferencia Axial de Cargas en una Cimentación Profunda dentro del suelo.

- c. En situaciones donde las capas del suelo localizadas por encima del estrato firme, son susceptibles a sufrir consolidación, origina un desplazamiento vertical hacia abajo del pilote desarrollándose “Esfuerzos de Fricción Negativa”, el cual tiende a hundir al pilote y si este no puede penetrar más en la punta del pilote se generará una presión concentrada, cuya magnitud está relacionada al valor de la cohesión del

suelo y a la posición relativa de cada pilote dentro del conjunto de la cimentación, por lo cual su efecto distorsionante sobre los asentamientos diferenciales es importante.

- d. Proporcionar anclajes a estructuras sujetas a fuerzas de levantamiento como subpresiones, momentos de volteo o cualquier otro efecto.
- e. Transferir cargas mediante la cimentación por debajo de la profundidad sujeta a erosión, socavación, licuefacción u otros efectos.
- f. Evitar daños que pueden producir una futura excavación a la cimentación de una edificación adyacente. En este caso el pilote lleva carga de cimentación debajo del nivel de excavación esperado.
- g. Proteger estructuras marinas como muelles, atracaderos contra impactos de embarcaciones u equipos flotantes.
- h. Soportar muros de contención, contrafuertes o cimentaciones de máquinas; es decir, resistir fuerzas horizontales o inclinadas. Las inclinaciones de 1H:3V representa aproximadamente la mayor inclinación que puede realizarse con el equipo ordinario para hincado.
- i. Compactar suelos granulares.

### **2.1.2 Clasificación de Cimentaciones Profundas con Pilotes**

La clasificación y selección del pilote más adecuado contempla un previo análisis de los siguientes factores:

- La carga aplicada. Algunos pilotes, como los de madera, tienen mejor comportamiento para cargas bajas a medias, mientras que otros, como el acero, tendrían más costo-beneficio para cargas altas.
- El diámetro requerido. Más tipos de pilotes son disponibles solo en diámetros establecidos.
- La longitud requerida. Las regulaciones de la vía de embarque y las alturas prácticas de hincado de pilotes generalmente limita la altura de los segmentos de pilote a alrededor de 18 m, por lo tanto, pilotes más largos consistirían de múltiples segmentos empalmados durante su instalación. Algunos tipos de pilotes son más fáciles de empalmar, mientras que otros no lo son.

- La disponibilidad local de cada tipo de pilotes. Algunos tipos de pilotes serían abundantes en áreas geográficas seguras, mientras que otros serían escasos. Esto puede afectar significativamente el costo de cada tipo.
- La durabilidad de los materiales del pilote en un ambiente específico. Ciertos ambientes pueden causar el deterioro del pilote.
- Las condiciones anticipadas de hincado. Algunos pilotes son tolerantes de hincados duros, mientras otros son más probablemente dañados.

De acuerdo con el Código Práctico Estandarizado Británico para Cimentaciones – BS 8004:1986 (Tomlison, M., 2008), los pilotes son clasificados en tres categorías que están relacionadas por el tipo de interacción con el suelo y su proceso de ejecución:

#### **a) Pilotes de Gran Desplazamiento**

Comprende pilotes de sección sólida o hueca con punta cerrada, que son hincados en el suelo y también desplaza el suelo. Se sub-dividen en:

**Pilote Tipo Hincado.** Dentro de esta categoría se encuentran los pilotes de sección sólida y de sección hueca con extremo cerrado y son:

- Madera de sección redonda o cuadrada.
- Concreto prefabricado de sección sólida o tubular.
- Concreto pretensado de sección sólida o tubular.
- Tubo de acero con extremos cerrados (también el tipo gateado).
- Tubo de acero aflautado y cónico.
- Cajón de acero.
- Pilote tipo Franki

**Pilote Tipo Hincado y Vaciado In Situ.** Corresponde a este tipo:

- Tubo de acero hincado y retirado después del vaciado del concreto.
- Cascarón de concreto prefabricado vaciado con Concreto.
- Cascarón de acero de pared delgada con mandril extraíble y luego vaciado con concreto.

### **b) Pilotes de Pequeño Desplazamiento**

Comprende pilotes hincados en el suelo pero tienen una relativa pequeña sección o hueca. Cuando estos pilotes en el proceso de hincado generan una sección llena con el suelo (“tapón” o “plug”), a partir de esa penetración se comportan como pilotes de gran desplazamiento. Estos pueden ser:

- Pilote prefabricado (sección tubular con extremo abierto).
- Pilote de concreto pretensado (sección tubular con extremo abierto o cruciforme).
- Pilote de acero de sección H.
- Pilote de acero de sección tubular (extremo abierto).
- Pilotes tornillo.
- Cilindro roscado.

### **c) Pilotes Reemplazantes (o Pilotes No Desplazantes)**

Comprenden los pilotes que remueven el suelo mediante distintos métodos de perforación produciendo un reemplazo del material por otro que sería el pilote con una distorsión mínima del terreno. El concreto es colocado fresco dentro de la perforación, también se puede introducir elementos prefabricados en dichos espacios. Los tipos más comunes son:

- Concreto vaciado en huecos perforados por taladros rotatorios, método de circulación invertida.
- Tubo puesto en hueco perforado con concreto vaciado in situ.
- Unidades de concreto prefabricado puesto en el hueco.
- Sección de acero puesto en el hueco perforado.
- Tubo de acero perforado en tierra.

Los pilotes también se pueden clasificar por el tipo de material que está elaborado. Los materiales comúnmente utilizados son madera, concreto, acero y de la combinación de ellos, estos generan a los pilotes denominados: pilotes de madera, pilotes de acero (pilotes h, pilotes tubulares u otro), pilotes de concreto y pilotes compuestos (pilotes de acero tubulares llenados con concreto, pilotes compuestos plástico-acero u otro).

---

## 2.2 PILOTES HINCADOS O DESPLAZANTES

Uno de los métodos utilizados para la construcción de pilotes es por medio de percusión o vibración, a los cuales se les denomina Pilotes Hincados o Desplazantes, ya sea de gran o pequeño desplazamiento del terreno.

En algunos casos el hincado de pilotes se combina con una perforación previa o, durante el hincado con una inyección de agua para facilitar la penetración del pilote. La inyección se efectúa a través de tuberías incorporadas dentro de la sección, en los pilotes de concreto prefabricado, o sujetas exteriormente, en caso de pilotes de madera o tubulares de acero. A través de estas tuberías se inyectan agua a alta presión, que sale por la punta del pilote erosionando el suelo ubicado debajo y luego asciende por la superficie exterior del pilote rompiendo la fricción lateral.

La inyección de agua se usa especialmente en arenas, en las que el hincado produce compactación, lo que puede ocasionar esfuerzos de hincado excesivos ó falso rechazo antes de la profundidad requerida; y con pilotes de madera ó concreto prefabricado que son los más susceptibles a dañarse por un fuerte hincado. Esta metodología debe utilizarse con precaución, ya que erosiona el suelo bajo la punta del pilote y reduce considerablemente la fricción lateral. Estos efectos que deben ser considerados en los cálculos de la capacidad de carga de los pilotes, y por esta razón sólo se debe utilizar inyección cuando haya sido especificada por el proyectista. Por otro lado, siempre que se utilice inyección, el tramo final debe ser introducido sólo por hincado, para asegurar un apoyo adecuado bajo la punta del pilote.

La principal pieza de equipo utilizado para la instalación de pilotes es el sistema de hincado de pilotes, o simplemente denominado martillo o martinete hincapilotes.

El martinete funciona en medio de un par de guías paralelas, o correderas, suspendidas de una grúa, generalmente de celosía. En la parte inferior, las guías se conectan a la base de la grúa por medio de un miembro horizontal, conocido como “macaco” o “helmet”, este puede alargarse o acortarse para permitir el hincado de pilotes inclinados y también para la nivelación.



---

### 2.2.1 Clases de Martillos

El martillo es el aparato que provee el impacto necesario para hincar al pilote hasta una profundidad o un ratio de penetración requerido. Repetidos golpes son necesarios, por lo tanto el martillo sería capaz de una rapidez cíclica. Además entregaría la suficiente energía para el avance del pilote, mientras no sea suficiente poderoso para romperlo. La selección de un apropiado martillo es una parte importante para la eficiencia en hincado de pilotes. Los principales tipos de martillos existentes son los siguientes:

#### a) Martillos de Caída Libre

Originalmente, las “piloteadoras” estaban equipadas con martillos que caían desde el extremo superior de las guías a la cabeza del pilote. Todavía se usan con frecuencia aparatos de este tipo. El pistón es izado mediante una cuerda que corre por arriba de un armazón y se extiende hasta un tambor o eje engranado, siendo liberado mediante un gatillo o es soltado del tambor que permite a la cuerda desenrollarse. En la construcción de los pilotes Tipo Franki, se usan martillos de gravedad que caen sobre el concreto fresco.

La clasificación de un martinete se basa en la energía total por golpe. En un martillo por gravedad, la energía es el producto del peso,  $Wh$ , del martillo por la altura de caída,  $H$ . La energía se pierde debido al rozamiento en las guías del martillo y el tambor. La eficiencia se define como energía producida en el impacto, dividida entre la energía total.

#### b) Martillos de Vapor, Neumáticos e Hidráulicos

Nuevos tipos de martillo empezaron a aparecer a fines del siglo XIX. Estos consisten en una unidad autosuficiente con un cabezal, pistón y mecanismo de levante. Estos martillos son un poco más pesados, pero altura de caída menores que el martillo de caída libre. Por ejemplo, Coduto D. (2001) nos muestra que el “Nasmyth Steam Pile-Driver” de los años 1880 tuvieron de 1400 a 2300 Kg de cabezal con altura de golpe de 9.00 metros. Sin embargo, esos martillos entregaban menos carga por golpe, ellos fueron más eficientes porque tenía ciclos mucho más rápidos (desde 60 golpes/mín para un martillo Nasmyth).

Los primeros martillos autosuficientes usaban vapor para elevar el cabezal. Este vapor fue producido por una caldera interior. Los martillos a vapor están aún en uso. Luego, los

martillos neumáticos (potenciados por compresor de aire) y martillos hidráulicos (potenciado por un fluido hidráulico de alta presión) fueron introducidos.

Todos los tres tipos pueden estar constituidos como martillos de simple acción o como uno de doble acción. Los martillos de simple acción levantan el cabezal por la presión aplicada a un pistón, como muestra la Figura 2.2a. Cuando el cabezal alcanza la altura deseada, típicamente sobre 0.9 m, una válvula de gas abre y, el martillo de caída libre, por gravedad impacta al yunque. Cuando es comparado con otros tipos, este diseño es caracterizado por una baja velocidad de impacto y pesado peso de cabezal.

Un martillo de doble acción, como muestra la Figura 2.2b, usa presión para ambos: el golpe de descenso y ascenso, por lo tanto entrega un mayor impacto que la que sería posible sólo por gravedad. La energía de impacto depende hasta cierto punto por la presión aplicada y por lo tanto puede ser controlada por el operador. Estos martillos usualmente tienen golpes más pequeños y ciclos más rápidos que los martillos de simple acción. Limitaciones en el diseño práctico restringe estos martillos desde la entrega, tanto como la energía comparable con los martillos de simple acción, entonces estos son usados principalmente para hincar pilotes laminados.

Un martillo diferencial, mostrado en la Figura 2.2c, es similar al martillo de doble acción en que usa aire, vapor, o presión hidráulica para levantar y bajar el cabezal, pero difiere en que tiene dos pistones con diferentes áreas de su sección en corte. Esto deja a los martillos diferenciales para uso de los cabezales pesados de martillos de simple acción y operar en altas velocidades y con la capacidad de control de los martillos de doble acción.

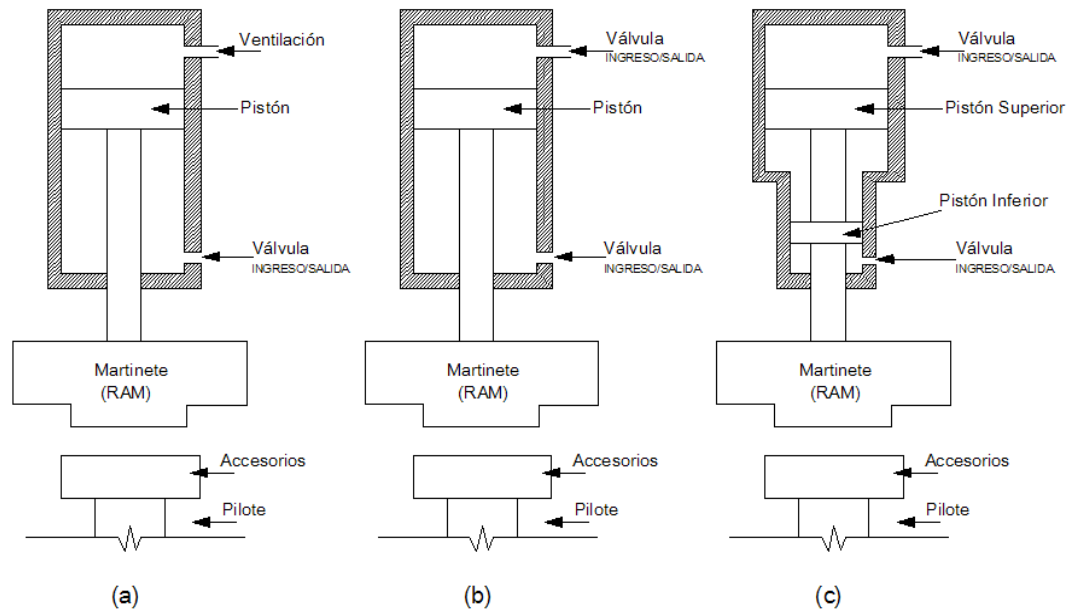


Figura 2.2: Martillos para Pilotes de Hincado Autosuficiente: (a) Simple Acción; (b) Doble Acción; y (c) Diferencial.

### c) Martillos DIESEL

Un martillo diesel, mostrado en la Figura 2.3, es similar a un motor de combustión interna diesel. Las caídas del cabezal desde la posición más alta y comprimir el aire en el cilindro inferior. En un punto cercano en el golpe, el combustible diesel es inyectado y la mixtura combustible-aire es comprimido más lejos hasta el cabezal impacta al yunque. La combustión sucede en este momento, forzando al cabezal subir y permitiendo otro ciclo empezar.

Los martillos diesel son cualquiera de los tipos simple acción (Open-Top) o doble acción (Closed-Top). Los martillos closed-top incluyen una cámara de rebote o amortiguador bajo el cabezal que otorga al martillo una energía equivalente de salida.

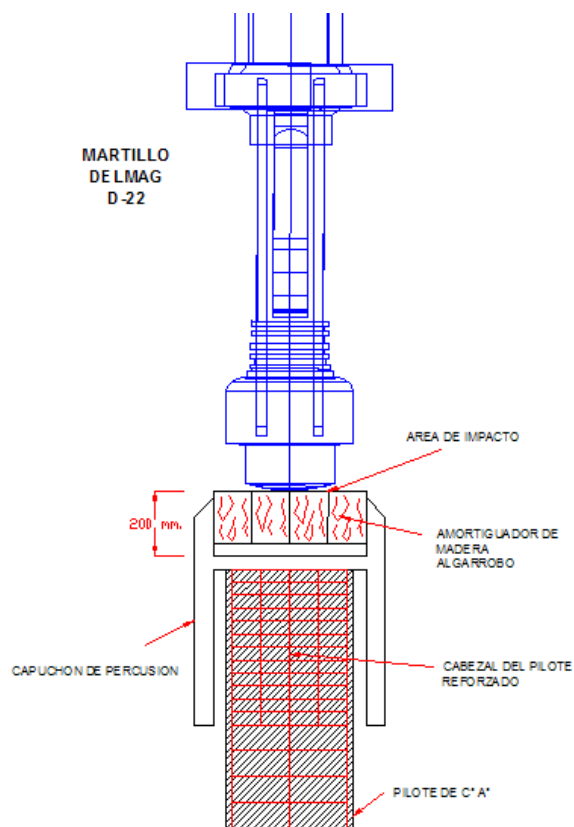


Figura 2.3: Esquema de Martillo Diesel DELMAG D22

El operador puede monitorear la energía de salida de un martillo diesel por la altura de elevación del pistón (en un martillo open-top) o la presión del amortiguador (en un martillo closed-top). Los martillos diesel desarrollan su máxima energía bajo condiciones de hincado en elementos pilote y suelo que ofrecen una mayor rigidez y no podría operarse adecuadamente bajo condiciones donde exista elementos pilote o suelo muy flexibles. Ellos típicamente entregan 40 a 50 golpes por minuto.

Actualmente la normativa sobre medio ambiente restringe el uso en algunos lugares por ruido, vibración y emisión de gases.

#### d) Martillos Vibratorios

Un martillo vibratorio no es un martillo en similar situación a los que se discutieron con anterioridad. Usan pesos de rotación excéntrica para crear vibraciones verticales. Cuando se combina con un peso estático, estas vibraciones fuerzan al pilote entrar al suelo. La

operación frecuente de los martillos vibratorios es tan alto como 150 Hz y puede ser ajustado para resonar con la frecuencia natural del pilote.

Los Martillos Vibratorios son más efectivos cuando son usados con pilotes son hincados en suelo arenoso. Ellos operan más rápidamente y con menos vibración y ruido que martillos de impacto convencional. Sin embargo, son inefectivos en arcillas, suelos contaminados u obstruidos semejantes al pedregoso.

#### **e) Accesorios**

Los sistemas de hincado de pilotes incluyen otros componentes además del martillo hincapilotes. Excepto por los martillos de caída libre, el cabezal no cae directamente a la parte superior del pilote. Semejantes criterios podrían dañar al pilote y martillo. En vez de eso, el cabezal golpea una plancha de acero. Esta transmite la energía de impacto a través de un amortiguador a una cabeza de hincado, “macaco” ó “helmet”. La cabeza de hincado ataca directamente al pilote excepto por un pilote concreto donde un amortiguador de pilote es colocado entre ellos.

Los amortiguadores suavizan el golpe severo desde el martillo para dispersarlo un momento más largo. Idealmente, ellos harían esto sin adsorber mucha energía. El amortiguador de martillo tradicional no es cercanamente tan eficiente como los más modernos de aluminio-micarta. Los amortiguadores de pilotes en el Perú son usualmente hechos de madera contraplacada.

### **2.3 DISEÑO Y VERIFICACION DE CIMENTACIONES PILOTEADAS**

El proceso de construcción de pilotes acarrea una serie de fases para la correcta operación de las estructuras, la FHWA (1998) establece una guía de procesos como sigue:

#### **Fase de Diseño**

- Primero se establece los requerimientos estructurales, características y condiciones del lugar.
- Características geológicas de la zona.

- Colectar experiencia de cimentaciones de la zona.
- Realizar un programa de exploraciones geotécnicas.
- Evaluación y selección del tipo de cimentación profunda (para el presente estudio se considera la selección de un pilote del tipo hincado)
- Calcular la capacidad, longitud y comportamiento bajo carga del pilote y estimación de la hincabilidad.
- Preparación de planos, especificaciones y procedimientos.

### **Fase de Construcción**

- Evaluación y selección del equipo de hincado en base de análisis dinámico.
- Establecimiento de criterio de hincado preliminar.
- Ejecución de programa de ensayos de carga preliminar para evaluar y verificar capacidades del pilote. Ajuste de criterio de hincado y/o diseño.
- Producción de pilotes definitivos paralelamente con un plan de monitoreo y control de calidad.

En el proceso de análisis y diseño de la capacidad geotécnica, paralelamente, se realiza el análisis estructural del pilote para cumplir con la resistencia de los siguientes considerandos:

- Compresión bajo cargas axiales.
- Compresión por impacto durante el hincado.
- Esfuerzos en el elemento durante el manipuleo y colocación.
- Tensión debida a fuerzas de subpresión, hinchamiento del suelo o rebote durante el hincado.
- Fuerzas horizontales que ocasionen flexión.
- Fuerzas excéntricas que causen flexión.
- Momentos flexionantes por curvatura.
- Efecto de columna en los tramos sin soporte lateral del terreno.

Como primer paso para la determinación de la capacidad de carga de un pilote se debe tener en cuenta los requerimientos de la superestructura como se mencionó anteriormente; los métodos tradicionales para el cálculo de la capacidad de carga están basados en

Esfuerzos o Estados Admisibles que utilizan un Factor de Seguridad (FS) para garantizar el correcto funcionamiento de la cimentación. La superestructura debe ser diseñada bajo esta misma metodología (Allowable Stress Design – ASD) para obtener las cargas adecuadas y evitar un sobredimensionamiento.

Actualmente, los métodos utilizados para el diseño estructural están basados en Estados Límites de Esfuerzos (Load and Resistance Factor Design – LRFD), donde todas las cargas de la superestructura son aumentadas mediante valores que son comparados con resistencias últimas de los materiales sometidos a un Factor de Reducción o Resistencia.

De acuerdo a (Likins, G.; 2003 & 2010), los factores de seguridad y de reducción de acuerdo a la metodología de diseño sería como sigue:

Tabla 2.1: Factor de Seguridad en Pilotes Hincados para Cargas por el Método de Esfuerzos Admisibles - ASD (Likins, G., 2003).

CODIGO  CARGAS	PDCA (2001)	AASHTO (1992)	IBC (2000)  > 40 Tn	AS2159 (1995)	ASCE (20-96) para Tipos de Pilotes Hincados (1996)		
					16 a 40 Tn	40 a 100 Tn	> 100 Tn
<i>Análisis Estático Analítico</i>	3.5	3.5	6.0	2.12 - 3.44	NA	NA	NA
<i>Fórmulas Dinámicas</i>	3.5	3.5	NA	2.50 - 3.06 (c)	2.0 - 2.4 (h)	NR	NR
<i>Ecuación de Onda</i>	2.5	2.75	NA	2.50 - 3.06	1.8 - 2.2	1.9 - 2.3	NR
<i>Ensayos Dinámicos</i>	1.9 - 2.1	2.25	2.0	1.72 - 2.12	1.6 - 2.0	1.7 - 2.0	2.0 - 2.4
	a			b	"a,f,g"	h	h
<i>Ensayos Estáticos</i>	1.8 - 2.0	2.0	2.0	1.53 - 1.93	1.5 - 1.8	1.6 - 1.9	1.8 - 2.2
	d			"f, g"	h	h	h
<i>Estático &amp; Dinámico</i>	1.65 - 1.9	1.9					
	"a, b, e"			j	j	j	j

Tabla 2.2: Factor de Reducción en Pilotes Hincados para Cargas por el Método de Estado Limite de Esfuerzos – LRFD (Likins G., 2010).

<b>Procedimiento Utilizado</b>	<b>Factor de Reducción</b>
<i>Fórmulas Analíticas</i>	<i>0.40</i>
<i>Ecuación de Onda</i>	<i>0.50</i>
<i>Ensayos de Carga Dinámicos (2 und ó 2%)</i>	<i>0.65</i>
<i>Ensayos de Carga Estáticos o 100% Dinámicos</i>	<i>0.75</i>
<i>Ensayos de Carga Estáticos &amp; 2% Dinámicos</i>	<i>0.80</i>

Para la Tabla 2.1, se han considerado la siguiente simbología:

a = Ensayo Dinámico requiere adaptación de señal.

b = Requiere correlación con Ensayos Estáticos

c = Fórmula Dinámica para Arenas solamente – No Arcillas.

d = < 2% Estático

e = > 1% Estático ó > 3% Dinámico

f = Aumentar FS si <3% dinámico ó <1% estático

g = Reducir FS si >15% dinámico ó >3% estático, y extender investigación de lugar con cuidadosos controles en la construcción.

h = Depende del tipo de pilote, variabilidad del lugar, condiciones de carga, etc.

j = No específicamente direccionado

NA = No aplicable.

NR = No recomendado.

De acuerdo a SMMS (2001), los factores de reducción para análisis por procedimientos analíticos están en 0.3 y las pruebas de carga estática o dinámica en 0.5.

La verificación o la determinación de la capacidad de carga de los pilotes se realizan mediante pruebas de carga realizadas a pilotes definitivos o provisionales del mismo proyecto en su ubicación definitiva o en una zona de donde el suelo sea similar. Los



valores más cercanos a la realidad son estos sobreponiéndose a los resultados de otros métodos.

El alcance de la presente tesis está referido a comportamiento axial del comportamiento suelo-pilote por lo que en esta sección se centrará en dicho tema.

Los métodos para la obtención de la capacidad de carga de la interacción suelo-pilote se pueden dividir en tres categorías teniendo como referencia a las distintas normativas a nivel mundial: Fórmulas Estáticas ó Dinámicas de resultados de exploraciones geotécnicas y ensayos de laboratorio; Fórmulas Dinámicas basadas en la Ecuación de Propagación de Onda; y Pruebas de Carga del Tipo Estática ó Dinámica a Escala Real en el Lugar, los mismos que son desarrollados a continuación:

### **2.3.1 Fórmulas Estáticas ó Dinámicas de Resultados de Exploraciones Geotécnicas y Ensayos de Laboratorio.**

#### **2.3.1.1 Métodos Estáticos**

También se les denomina como métodos analíticos o métodos basados en ensayos in situ. Estos métodos usan las propiedades de resistencia del suelo, como son el Ángulo de Fricción,  $\Phi$ , o Resistencia Cortante No Drenada,  $S_u$ , o los resultados de Ensayos de Campo In Situ (Ensayos de Penetración Estándar, Ensayos de Cono de Penetración, etc).

Estos análisis son similares a los realizados para cimentaciones superficiales. Desafortunadamente, esta labor es fundamentalmente más difícil para pilotes por los siguientes motivos:

- El proceso de hincado de pilotes cambia las propiedades del suelo. Por lo tanto, las propiedades de suelo obtenido de muestras no perturbadas no necesariamente refleja las condiciones de post-construcción.
- La interacción entre pilotes y suelo es más compleja que los de una zapata de cimentación.

Estos métodos de análisis evalúan el aporte por Fricción Lateral y por Punta separadamente y combinándolos en las siguientes ecuaciones:

$$Q_R = \phi \cdot Q_n = \phi_{punta} \cdot Q_p + \phi_{friccion} \cdot Q_f \quad (2.1)$$

Siendo:

$$Q_f = q_s \cdot A_s \quad (2.2)$$

$$Q_p = q_p \cdot A_p \quad (2.3)$$

Donde:

$Q_R$  = Capacidad axial de carga resultante del pilote (según ASD ó LRFD).

$Q_n$  = Capacidad axial de carga última del pilote.

$Q_f$  = Capacidad axial de carga por aporte de fricción lateral

$Q_p$  = Capacidad axial de carga por aporte por punta

$\phi$  = Factor en función de la metodología utilizada (ASD ó LRFD)

$q_s$  = Resistencia por fricción superficial nominal por unidad de área

$q_p$  = Resistencia por punta nominal por unidad de área

$A_s$  = Área de aporte por fricción lateral

$A_p$  = Área de aporte por punta

De acuerdo a Kulhawy (AASHTO, 2010), la resistencia por punta como la resistencia por aporte lateral se desarrollan en respuesta al desplazamiento del pilote. Es poco probable que los máximos valores de ambas resistencias ocurran para el mismo desplazamiento. La resistencia por aporte lateral se obtiene a su máxima capacidad con desplazamientos entre 2.5 a 10 mm, por otro lado la capacidad por punta se obtiene con una movilización de asentamiento del pilote aproximadamente el 8 por ciento de su diámetro.

Para el diseño de pilotes hincados mediante métodos analíticos existen diversas formulaciones como son las de Terzaghi, Meyerhof, Vesic, Janbu y/o utilizando ensayos de campo, como el SPT y el CPT.

La normativa peruana no establece específicamente un método para la determinación la capacidad suelo-pilote. Para fines de la presente investigación se realizará un resumen tomando la metodología indicada por el AASHTO (2010) que es referencia normativa en el Perú para el diseño de pilotes:

**a. Resistencia por Fricción Lateral para Suelos Cohesivos**

**Método  $\alpha$ .** Este método es aplicado cuando existe una predominancia de arcilla o suelo cohesivo en su longitud considerando tensiones totales.

$$q_s = \alpha \cdot S_u \tag{2.4}$$

Donde:

$q_s$  = Fricción superficial unitaria (MPa)

$S_u$  = Resistencia al corte no drenada promedio (MPa)

$\alpha$  = Factor de adherencia aplicado a  $S_u$

El factor de adherencia está en función de la distribución de los estratos y de la resistencia al corte no drenada (Tomlinson, M., 2008):

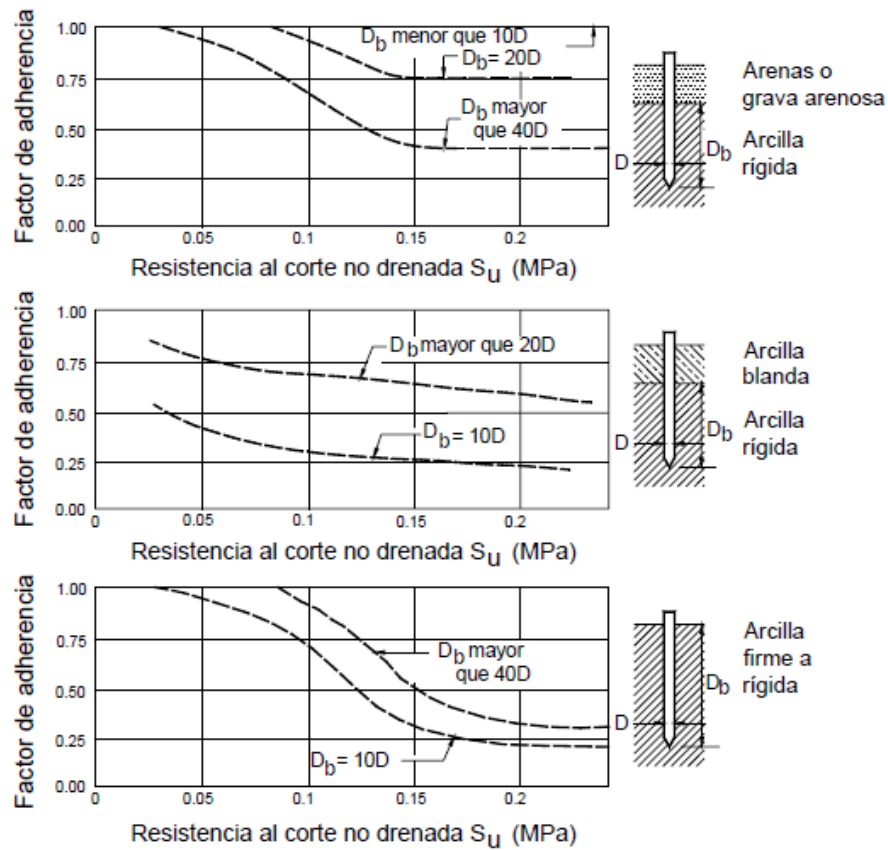


Figura 2.4: Curvas para determinación de Factor de Adherencia para pilotes hincados en suelos No Cohesivos (AASHTO, 2010)

**Método  $\beta$ .** Este método, basado en tensiones efectivas, está elaborado cuando existe una predominancia de pilotes en arcillas normalmente consolidadas o ligeramente sobreconsolidadas. El factor  $\beta$  de la fórmula no debe ser mayor de 2 en arcillas muy sobreconsolidadas.

$$q_s = \beta \cdot \sigma'_v \quad (2.5)$$

Donde:

$q_s$  = Fricción Superficial Unitaria (MPa)

$\sigma'_v$  = Tensión Efectiva Vertical (MPa)

$\beta$  = Factor de adherencia

El factor de adherencia está en función de la relación de Sobreconsolidación, OCR (AASHTO, 2010):

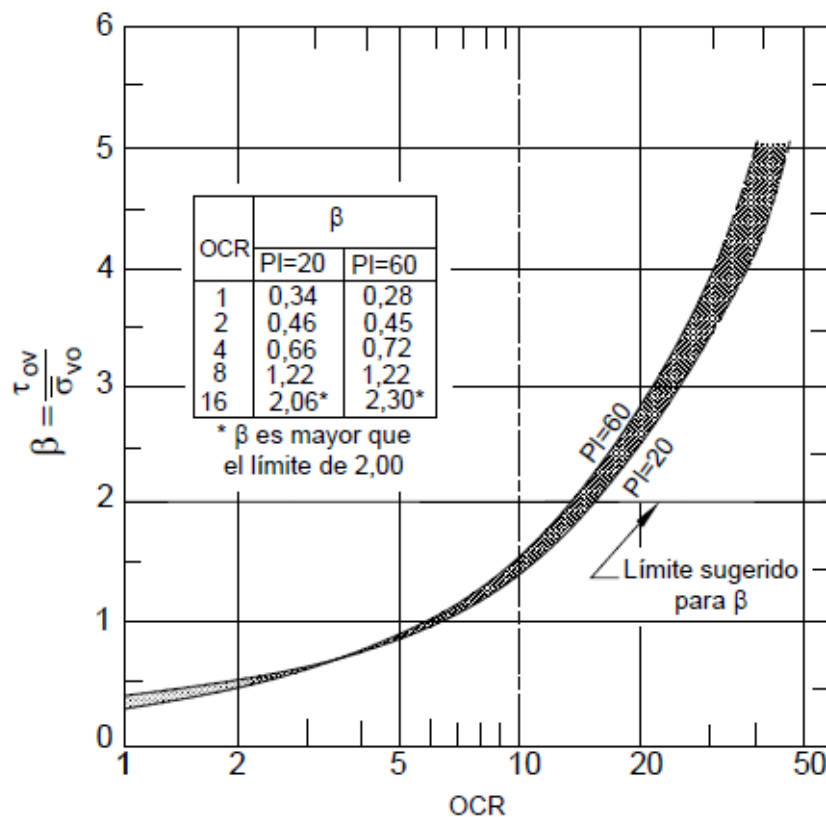


Figura 2.5: Curvas  $\beta$  vs. OCR para pilotes de desplazamiento (AASHTO, 2010)

### Método $\lambda$

Este método, basado en tensiones efectivas, es aplicado cuando existe una predominancia de pilotes en suelos arcillosos o cohesivos. Los factores utilizados para este método fueron calculados en base a ensayos de carga de pilotes tubulares de acero.

$$q_s = \lambda \cdot (\sigma'_v + 2S_u) \quad (2.6)$$

Donde:

$q_s$  = Fricción Superficial Unitaria (MPa)

$\sigma'_v + 2S_u$  = Empuje Pasivo Lateral del Suelo (MPa)

$\lambda$  = Factor de adherencia

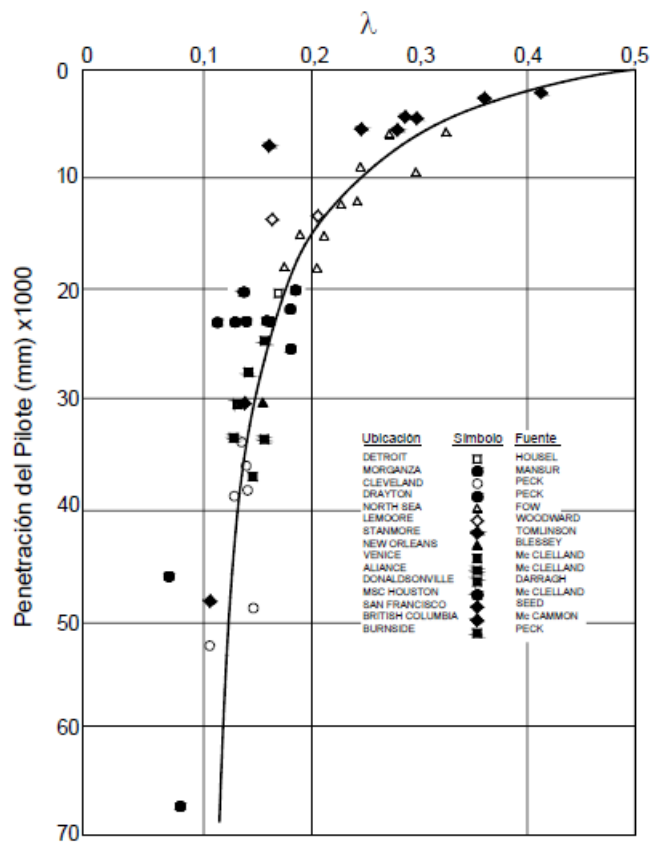


Figura 2.6: Curva de Resultados de Ensayos de Carga de Pilotes Tubulares Hincados para la determinación del valor  $\lambda$  (AASHTO, 2010)

### **b. Resistencia Por Punta para Suelos Cohesivos**

Este método es utilizado cuando existe una predominancia de arcilla saturada:

$$q_p = 9 \cdot S_u \quad (2.7)$$

Donde:

$q_p$  = Resistencia de Punta Unitaria (MPa)

$S_u$  = Resistencia al Corte No Drenada de la arcilla circundante a la punta del pilote (MPa)

### **c. Resistencia Por Fricción Lateral para Suelos No Cohesivos**

#### **Método Utilizando Ensayos SPT**

Esta metodología es aplicable a arenas y limos no plásticos. Para el caso de pilotes de gran desplazamiento (con punta cerrada) se utilizaría:

$$q_s = 0,0019 \cdot \bar{N} \quad (2.8)$$

Para el caso de pilotes de desplazamiento corto (con punta abierta o poca área de punta llena) se utilizaría:

$$q_s = 0,00096 \cdot \bar{N} \quad (2.9)$$

Donde:

$q_s$  = Resistencia de Fricción Superficial Unitaria (MPa)

$\bar{N}$  = Número de Golpes Promedio (no corregido) del SPT en toda la longitud del pilote (golpes/30 cm)

### Método Utilizando Ensayos CPT

Esta metodología, también se puede utilizar en suelos cohesivos, consiste en realizar una sumatoria de aportes a lo largo del fuste del pilote donde fueron instrumentados por el equipo CPT. Para el cálculo de la capacidad por fricción de utiliza:

$$q_s = K_{s,c} \cdot \left[ \sum_1 \left( \frac{L}{8D} \cdot f_s \cdot a_s \cdot h \right) + \sum_2 (f_s \cdot a_s \cdot h) \right] \quad (2.10)$$

Donde:

$K_{s,c}$  = Factores de corrección:  $K_C$  para arcillas y  $K_S$  para arenas

$L$  = Profundidad hasta la mitad del intervalo de longitud en el punto considerado (mm)

$D$  = Ancho o Diámetro del pilote en el punto considerado (mm)

$f_s$  = Resistencia local unitaria por fricción de la camisa determinada en un ensayo CPT en el punto considerado (MPa)

$a_s$  = Perímetro del Pilote en el punto considerado (mm)

$h$  = Altura entre anterior punto y actual punto considerado (mm)

$\Sigma_1$  = Esta sumatoria considera una longitud entre la parte superior del pilote y hasta 8 veces el diámetro del pilote por debajo de ese nivel.

$\Sigma_2$  = Esta sumatoria considera desde 8 veces el diámetro del pilote por debajo de su cabezal y la punta del pilote.

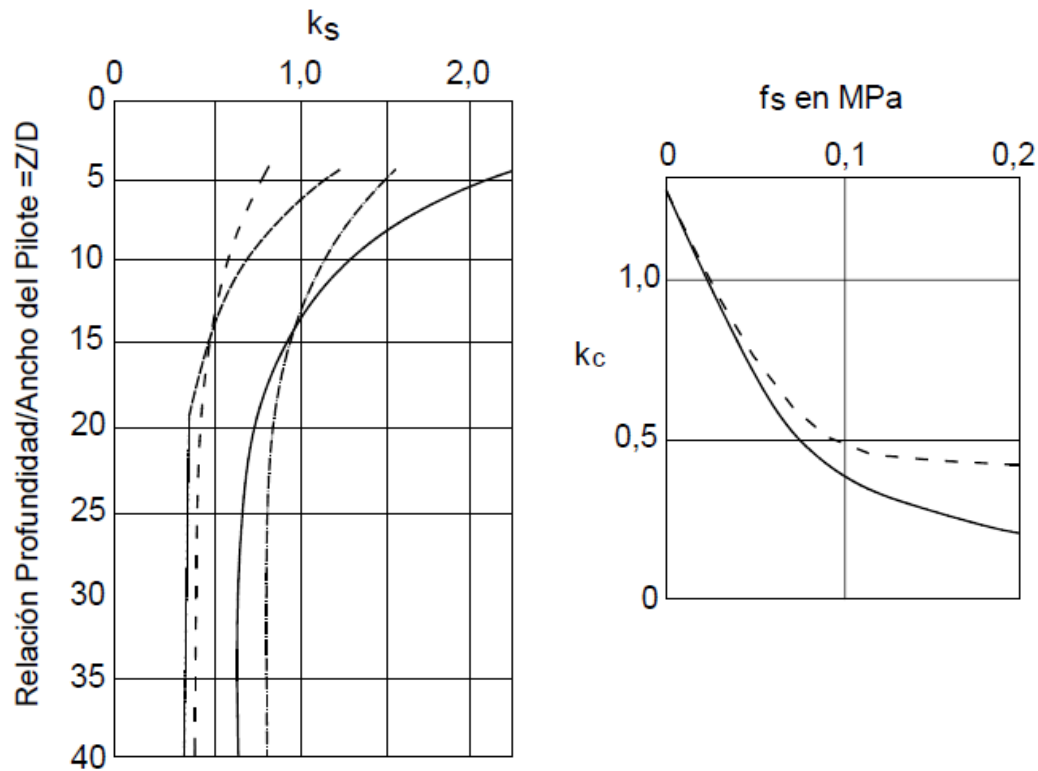


Figura 2.7: Factores de Corrección para resistencia friccional,  $K_S$  y  $K_C$  (AASHTO, 2010)

#### d. Resistencia Por Punta para Suelos No Cohesivos

##### Método Utilizando Ensayos SPT

Esta metodología es aplicable a arenas y limos no plásticos. El valor de resistencia de punta unitaria no debe ser mayor a  $0.4 N_{corr}$  para el caso de arenas y  $0.3 N_{corr}$  para el caso de limo no plástico.

$$q_p = \frac{(0,038 \cdot N_{corr} \cdot H)}{D} \quad (2.11)$$

Donde:

$q_p$  = Resistencia por Punta Unitaria (MPa)

$N$  = Número de Golpes del SPT cerca a la punta del pilote (golpes/30 cm)

$N_{corr}$  = Número de Golpes del SPT cerca a la punta del pilote (golpes/30 cm) corregido considerando una sobrecarga de presión de suelo.



$$N_{corr} = \left( 0,77 \cdot \log \left( \frac{1,92}{\sigma'_v} \right) \right) \cdot N \quad (2.12)$$

### **Método Utilizando Ensayos CPT**

La fórmula utilizada por este método para los resultados de los ensayos CPT sería:

$$q_p = \frac{(q_{c1} + q_{c2})}{2} \quad (2.13)$$

Donde:

$q_p$  = Resistencia por Punta Unitaria (MPa)

$q_{c1}$  = Menor Valor de resistencia a la penetración del cono entre 0.7 y 4.0 veces el diámetro del pilote por debajo de la punta (MPa)

$q_{c2}$  = Valor Promedio de resistencia a la penetración del cono entre una longitud 8 veces el diámetro desde la punta hacia la superficie.

### **e. Resistencia Por Punta para Rocas**

Esta metodología es aplicable para rocas con discontinuidades mayores a 300 mm y cuando las discontinuidades no rellenas tienen un ancho menor que 6.4 mm o las discontinuidades rellenas con suelo o escombros de roca con un ancho menor que 25 mm.

Las rocas blandas como lutitas o calizas débiles deben considerarse como suelo.

$$q_p = 3 \cdot q_u \cdot K_{sp} \cdot d \quad (2.14)$$

$$K_{sp} = \frac{\left( 3 + \frac{S_d}{D} \right)}{\left( 10 \cdot \sqrt{1 + 300 \cdot \frac{t_d}{S_d}} \right)} \quad (2.15)$$

$$d = 1 + 0.4 \cdot \frac{H_s}{D_s} \quad (2.16)$$

Donde:

$q_u$  = Resistencia promedio a la compresión uniaxial del núcleo rocoso (MPa)

$d$  = Factor de profundidad

$K_{SP}$  = Coeficiente de capacidad de carga

$S_d$  = Separación de las discontinuidades (mm)

$t_d$  = Ancho de las discontinuidades (mm)

$D$  = Ancho del pilote (mm)

$H_s$  = Profundidad embebida de un pilote empotrado en roca, se considera "0" para pilotes apoyados sobre el estrato rocoso (mm)

$D_s$  = Diámetro de la perforación para el pilote empotrado en roca (mm)

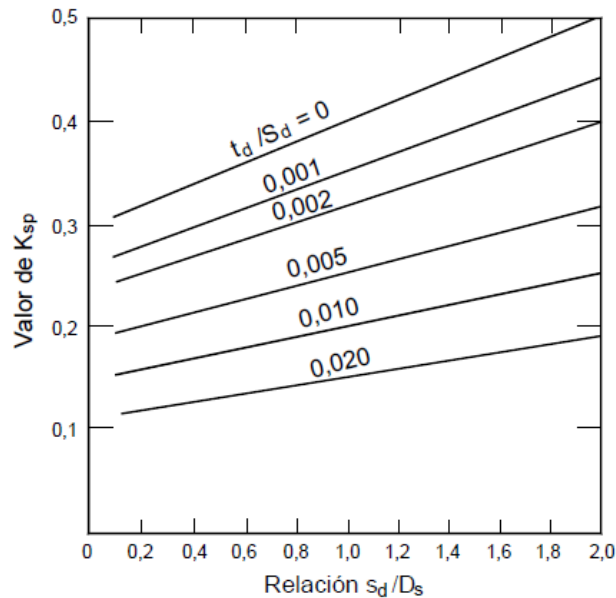


Figura 2.8: Curva para obtención de Coeficiente de Capacidad de Carga (AASTHO, 2010)

## f. Asentamiento en Pilotes

El asentamiento de pilotes puede ser estimado por la suma de los asentamientos axiales y puntuales de la siguiente manera:

- Cálculo del Asentamiento Axial:

$$\Delta H_p = \Delta H_a + \Delta H_{pt} \quad (2.17)$$

La Fuerza Axial Promedio,  $P_{av}$ , en cada segmento de la longitud  $\Delta L$ , la sección promedio  $A_{av}$ , y el Módulo de Elasticidad  $E_p$  desde la cabeza del pilote al punto. Que es:

$$\Delta H_{s,s} = \frac{(P_{av} \cdot \Delta L)}{(A_{av} \cdot E_p)} \quad (2.18a)$$

La suma de los valores se obtiene la Compresión Total Axial:

$$\Delta H_a = \Sigma \Delta H_{s,s} \quad (2.18b)$$

- Cálculo del Asentamiento Puntual usando la siguiente ecuación:

$$\Delta H_{pt} = \Delta q \cdot D \cdot \left( \frac{1 - \mu^2}{E_s} \right) \cdot m \cdot I_s \cdot I_F \cdot F_l \quad (2.19)$$

Donde:

$mI_s = 1.0$  (Factor de Forma)

$I_F$  = Factor de Empotramiento, sus valores son;

0.55 si  $L/D \leq 5$

0.50 si  $L/D > 5$

$D$  = Diámetro del Pilote o la dimensión lateral más pequeña para rectángulos u otros.

$\mu$  = Relación de Poisson ( usar  $\mu = 0.35$ )

$\Delta q$  = Presión Resistida en el Punto = Carga aplicada/ $A_p$ )

$E_s$  = Módulo del Suelo debajo del punto de la punta del pilote:

$$\text{SPT: } E_s = 500(N + 15)$$

$$\text{CPT: } E_s = 3 \text{ a } 6 q_c \text{ (usar 5, 6 si } OCR > 1)$$

$$S_u : E_s = 100 \text{ a } 500 s_u \text{ (} I_p > 30)$$

$$E_s = 500 \text{ a } 1500 s_u \text{ (} I_p < 30 \text{ o es rígido)}$$

$F_1$  = Factor de Reducción:

0.25 si la Resistencia es por Fricción sin la Carga por Punta  $P_p < 0$

0.50 si la Carga es por Punta  $P_p > 0$

0.75 si la carga es por Punta (considerando Resistencia por Fricción)

### 2.3.1.2 Métodos Dinámicos

Los más tempranos intentos en desarrollar métodos dinámicos estuvieron basados en correlaciones empíricas entre el peso del martillo, cuenta de golpes (número de golpes por cierta distancia de penetración), y otros factores relacionados con la capacidad estática. Estos son ampliamente conocidos como “Fórmulas de Hincado de Pilotes”.

Cientos de fórmulas de hincado de pilotes han sido mejoradas con los años, algunas de ellas datan del año 1850. Aunque estas fórmulas tienen diferentes formatos, todas comparten una metodología de cálculo de capacidad de pilotes basada en la energía del hincado entregado por el martillo. Ellos utilizan el Principio de la Conservación de la Energía para calcular el trabajo efectuado durante el hincado después de intentar considerar los varios vacíos e ineficiencias en el sistema de hincado.

Las fórmulas de hincado de pilotes son convenientes porque se puede calcular la capacidad de cada pilote como es hincado por simples determinación del conteo final de golpes.

La relación común básica para todas las fórmulas de hincado de pilotes es:

$$P_a = \frac{W_r \cdot h}{s} \quad (2.20)$$

Donde:

$P_a$  = Capacidad de Carga Vertical Neta

$W_r$  = Peso del cilindro del Martillo

$h$  = Descarga de Martillo (distancia de caída del martillo)

$s$  = Penetración del Pilote por golpe

La Fórmula de Sanders de 1851 (Prakash S., 1990), usa la Ecuación 2.20 con un factor de seguridad tan alto como 8. Ese valor relativamente alto es particularmente un factor de seguridad adecuado y un método de contabilizar la pérdida de energía. Ha llegado a ser desde hace mucho tiempo la fórmula propuesta por el *Engineering News Record* (ENR), una de las más conocidas ecuaciones de hincado:

$$P_a = \frac{W_r \cdot h}{s + c} \quad (2.21)$$

Basado en datos de ensayos de carga, el uso del coeficiente “c” de 25 mm cuenta como la diferencia entre la penetración teórica y práctica. Sin embargo, esta información sólo incluye pilotes de madera. Algunos utilizan  $c = 2$  mm para martillo de simple acción y además se recomienda utilizar un factor de seguridad igual a 6.

Housel (1966, obtenido de Coduto D., 2001) realizó una serie de ensayos con el único objetivo de evaluar la Fórmula *Engineering News Record*. Siguiendo el hincado y ensayo de carga de 88 pilotes, se encontró que la esta fórmula sobre predecía la capacidad de los pilotes por un factor de 2 a 6. Por lo tanto, los pilotes diseñados usando un factor de seguridad igual a 6 actualmente tiene un factor entre 1 y 3. Basado en estos resultados, se desarrollo la Fórmula Modificada de *Engineering News Record*:

$$P_a = \frac{(0.0025 \cdot E \cdot (W_r + e^2 \cdot W_p))}{(s + 0.1)(W_r + W_p)} \quad (2.22)$$

Donde:

$P_a$  = Carga Admisible del Pilote (k)

$E$  = Energía del Martillo por golpe (pie-lb)

$W_p$  = Peso del pilote más accesorios de hincado (lb)

$W_r$  = Peso del Cilindro del Martillo (lb)

$s$  = Penetración del Pilote (pulg/golpe)

$e$  = Coeficiente de Restitución (basado en tipos de pilote y martillo)

Tabla 2.3: Relación de Valores Típicos para Eficiencia del Martillo (Coduto D., 2001)

<b>Tipo de Martillo</b>	<b>Eficiencia</b>
Preexcavadoras	0.75 - 1.00
Martillos de Acción Simple y Doble	0.70 - 0.85
Martillos Diesel	0.80 - 0.90
Martillos de Caída Libre	0.70 - 0.90

Tabla 2.4: Relación de Valores Típicos para Coeficiente de Restitución (Coduto D., 2001)

<b>Material</b>	<b>Coeficiente Restitución</b>
Madera Aplastada	0.00
Pilotes de Madera (no deteriorado en su final)	0.25
Amortiguador de madera compactada en Pilotes de Acero	0.32
Amortiguador de madera compactada sobre Pilotes de Acero	0.40
Acero en Yunque de Acero en Pilote de Acero o Concreto	0.50

Todas las fórmulas dinámicas comunes para los pilotes igualan la energía aplicada por el martillo al trabajo realizado por el pilote al penetrar una distancia “ $s$ ” contra una resistencia última  $P_U$ , basadas en esta teoría se han desarrollado un sin número de ecuaciones de las cuales las más conocidas son las siguientes (Lara J., 2007):

- Fórmula del Código Nacional de Construcción de Canadá
- Fórmula de Danish
- Fórmula de Eytelwein
- Fórmula de Gates
- Fórmula de Janbu
- Fórmula de Navy-Mckay
- Fórmula de Michigan State Highway Commission (MSHC)
- Fórmula de Martillos DELMAG
- Fórmula de Brix
- Fórmula de Vierendeel
- Fórmula de Rankine
- Fórmula de Goodrich
- Fórmula de Hiley

A continuación se desarrollarán las más recomendadas:

**a) Fórmula de Gates**

Esta ecuación es recomendada por el FHWA (1998), debido a que tuvo mejores correlaciones con ensayos de carga estáticos ejecutados por ese organismo del gobierno de EEUU. La fórmula a continuación muestra la capacidad última del pilote e incluye una eficiencia del 80%, como lo recomienda el autor:

$$R_u = (7 \cdot E_r^{1/2} \cdot \log(10N_b)) - 550$$

(2.23)

Donde:

$R_u$  = Capacidad de Carga Última (KN)

$E_r$  = Energía del Martillo (Joule)

$N_b$  = Número de Golpes del Martillo por cada 25mm al final de la instalación.

El factor de seguridad global considerado para esta ecuaciones es 3.5.

## b) Fórmula de Hiley

Esta ecuación es recomendada entre otras fuentes por la normativa de Hong Kong (2006). El coeficiente de seguridad se toma igual a 3 ó 4.

$$R_p = \frac{\eta_h \cdot \alpha_h \cdot W_h \cdot d_h}{s + 0.5 \cdot (c_p + c_q + c_c)} \quad (2.24a)$$

Siendo:

$$\eta_h = \frac{W_h \cdot e^2 \cdot (W_p + W_r)}{(W_h + W_p + W_r)} \quad (2.24b)$$

Donde:

$R_p$  = Capacidad de Carga Última

$\alpha_h$  = Eficiencia del Martillo

$e$  = Coeficiente de Restitución

$W_p$  = Peso del Pilote

$W_r$  = Peso del Cabezal, Macaco o Helmet

$W_h$  = Peso del Pistón

$d_h$  = Altura de Caída del Pistón

$s$  = Asentamiento Permanente del Pilote

$c_p$  = Compresión Temporal del Pilote

$c_q$  = Compresión Temporal del Suelo

$c_c$  = Compresión Temporal del Amortiguador Pilote-Martillo



Tabla 2.5: Relación de Valores Típicos para Coeficiente de Fórmula Hiley (Coduto D., 2001)

Amortiguador Pilote- Martillo	Valores Cc			
	Presión sobre la Cabeza del Pilote Kg/cm <sup>2</sup>			
	35.15	70.30	105.75	140.60
Pilote de Madera	0.2700	0.2540	0.3810	0.5080
Pilote de Concreto	0.0500	0.0127	0.0180	0.0254
Pilote de Acero (Amortiguador de Madera)	0.1010	0.2030	0.0300	0.0406
Amortiguador de Acero	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Pilote de Acero (Amortiguador de Madera)	0.101	0.203	0.304	0.406
Amortiguador de Acero	0.000	0.000	0.000	0.000

Tipo de Pilote	Valores Cp			
	Presión sobre la Cabeza del Pilote Kg/cm <sup>2</sup>			
	35.15	70.30	105.75	140.60
Pilote de Madera	0.270	0.254	0.381	0.508
Pilote de Concreto	0.063	0.127	0.190	0.254
Pilote de Acero (Amortiguador de Madera)	0.101	0.203	0.304	0.406
Amortiguador de Acero	0.000	0.000	0.000	0.000

Valores Cq			
Presión sobre la Cabeza del Pilote Kg/cm <sup>2</sup>			
35.15	70.30	105.75	140.60
0 a 0.0154	0.0254 a 0.05	0.0254 a 0.0762	0.00127 a 0.0058

### 2.1.1 Fórmulas Dinámicas basadas en la Ecuación de Propagación de Onda.

Las Fórmulas de Hincado de Pilotes descritas anteriormente considera al pilote como cuerpo rígido. En otras palabras, ellas asumen al pilote entero movido descendentemente como una unidad. En realidad, la carga de impacto proveniente del martillo es muy pequeña comparado al tiempo requerido para la onda de compresión resultante alcance la parte inferior del pilote, entonces partes del pilote podrían descender, mientras otras partes están estacionarias o incluso ascienden (en respuesta a la onda reflectada). Sin embargo, es

mucho mejor considerar los efectos de la propagación de la onda de tensión cuando se evalúa el proceso de hincado del pilote.

La propagación de onda unidimensional en una varilla larga esbelta, como es el pilote, es descrita por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \cdot \frac{\partial^2 u}{\rho \cdot \partial z^2} \quad (2.25)$$

Donde:

Z = Profundidad Debajo de la Superficie del Terreno

t = Tiempo

u = Desplazamiento del Pilote en la Profundidad z

E = Módulo de Elasticidad del Pilote

$\rho$  = Densidad de la Masa del Pilote

Esta fórmula es manejable cuando las condiciones límite son simples, pero llega a ser mucho más difícil con condiciones límites complejas asociadas con cimentaciones piloteadas. La mayoría de problemas prácticos son resueltos usando métodos numéricos, y este no es posible digitalizar en computadora para llegar a ser adecuado. Smith experimentó con soluciones numéricas poco después de la II Guerra Mundial en donde apareció haber tenido una de las primeras aplicaciones civiles de la digitalización computarizada. El después redefinió este trabajo y fórmula la base para el moderno Análisis de Pilotes por medio de la Ecuación de Onda (Restrepo V., 2005).

### 2.1.1.1 Análisis del Comportamiento y Esfuerzos desarrollados en los Pilotes

Una modelación realista de la dinámica del hincado de pilotes debe considerar la compleja cadena de eventos iniciada por un golpe del martillo. La energía aplicada por el martillo origina esfuerzos que dependen del tiempo, y desplazamientos en el conjunto pilote-cabeza, en el pilote y en el suelo que lo rodea. Como la longitud de un pilote es siempre grande en comparación con su diámetro, lo que indica que no se comporta como una sola

masa rígida o concentrada sino, como ya se mencionó, en forma más aproximada a una barra elástica, en la que los esfuerzos se mueven longitudinalmente como ondas.

Cuando las ondas son de compresión, como en la punta del pilote que se hincan en un material más duro, hacen que el pilote penetre en el terreno. Sin embargo, si los esfuerzos de compresión son demasiado grandes pueden dañar los pilotes. Por otra parte, cuando el suelo en la punta es blando y el hincado es fácil, la onda de compresión puede reflejarse hacia arriba del extremo del pilote como onda de tensión. Si en algún punto del pilote, el esfuerzo de tensión no lo anulan otros de compresión, puede desarrollarse una tensión neta, cuando menos por un instante. El esfuerzo puede ser suficiente para agrietar un pilote de concreto prefabricado.

La teoría de la transmisión de ondas en una barra elástica prismática golpeada longitudinalmente con un objeto rígido, se elaboró hace más de un siglo, y se obtuvieron soluciones numéricas para varias condiciones se simplifican tanto con respecto a las complejidades del hincado real, que las soluciones tienen poco valor práctico. La introducción de condiciones realistas fue posible solamente con el desarrollo de modelos adecuados y la computación.

De acuerdo con la teoría del impacto longitudinal de una barra prismática elástica, las ondas de esfuerzo se mueven axialmente con una velocidad de:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.26a)$$

Donde: E es el módulo de elasticidad y,  $\rho$  es la densidad del material de la barra o pilote. La densidad se define como:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (2.26b)$$

Donde:  $\gamma$  es el peso específico del material que constituye la barra o pilote y, g es la aceleración de la gravedad. La velocidad c de la onda de esfuerzo no debe confundirse con la velocidad, v, a la que un punto particular de la barra se mueve en realidad. La primera, conocida como velocidad de propagación longitudinal de la onda, misma que en algunos casos es llamada velocidad sísmica, es una constante para un material sólido elástico dado.

Durante el paso de una sola onda, el esfuerzo longitudinal directo en la barra en cualquier punto, está relacionado a la velocidad de la partícula en ese punto por la sencilla expresión:

$$f = \frac{E_v}{c} = \rho \cdot c \cdot v \quad (2.26c)$$

La fuerza transmitida a través de una sección de la barra es entonces:

$$F = f \cdot A = \rho \cdot c \cdot A \cdot v \quad (2.26d)$$

Como la velocidad,  $v$ , es función de la posición y tiempo,  $F$  y  $f$  son de la misma manera funciones de estas cantidades. La facultad de la barra para transmitir fuerza longitudinal se mide por el producto,  $\rho \cdot c \cdot A$ , denominado impedancia del pilote.

La capacidad de un pilote a una profundidad dada, es la fuerza que puede ejercerse por el suelo que lo rodea contra un desplazamiento hacia abajo. Tiene que haber una transmisión de por lo menos esta fuerza al suelo por el pilote durante el hincado, para que la punta penetre a una posición dada durante el último golpe del martillo. En particular, debe transmitirse suficiente fuerza al pilote para vencer las resistencias laterales y de punta.

Inversamente, no importa cuanta energía pueda aplicarse a la cabeza del pilote, la fuerza que puede transmitirse a través del pilote hacia abajo está limitada por la impedancia.

Como la impedancia ( $\rho \cdot c \cdot A$ ) determina la fuerza máxima que puede transmitirse a lo largo del pilote mientras el material permanezca elástico, es decir, en medida de la posibilidad del pilote para desarrollar la capacidad requerida como consecuencia de estar hincado en el terreno. Si se aumenta la impedancia del pilote, el potencial para obtener una mayor capacidad con un martillo determinado también aumenta, siempre que el pilote no tenga dimensiones tan grandes con respecto al martillo, que su acción se parezca a la de una masa grande en vez de una barra.

Las propiedades que tienden a aumentar la impedancia son el aumento de densidad, el mayor módulo de la elasticidad, y la mayor área de la sección transversal. Para un material dado, la impedancia depende solamente del área la influencia del relleno de concreto en el pilote de tubo es notable.

La capacidad dinámica que poseerá el pilote dependerá de varios factores ya sean externos o internos en el pilote. La fuerza realmente desarrollada en la punta del pilote dependerá no solamente de la impedancia del pilote sino también de la energía que pueda obtenerse del martinete y de otros muchos factores. A continuación se pasan a detallar los factores influyentes:

#### **a) Martillos Hincapilotes**

Los martinetes difieren mucho en la manera en que aplican la energía al yunque o al amortiguador del martinete. Los martinetes diesel ejercen fuerzas de duración grande, en comparación con las ejercidas por los de vapor. La energía total realmente transmitida por un martinete, puede determinarse mejor haciendo medidas continuas de la velocidad del martillo al aproximarse al pilote y cuando invierte la dirección, y sube nuevamente. Estas medidas han demostrado que la eficiencia de los martinetes bien conservados tiene poca relación con los factores de eficiencia dados por los fabricantes y que las eficiencias de los que reciben un mal mantenimiento o se operan incorrectamente pueden ser extremadamente bajas (Bowles J., 1997).

#### **b) Amortiguadores**

Los bloques amortiguadores de los pilotes pueden describirse como blandos o como duros. Para un martinete y pilotes dados, la onda de esfuerzo es reducida si el amortiguador es blando, es más larga y su esfuerzo máximo es menor que si el amortiguador es duro. Los esfuerzos menores alargan la vida del martinete y dañan menos a los pilotes. Sin embargo, si la fuerza máxima generada con el amortiguador blando no es suficiente para producir la capacidad máxima deseada en el pilote, puede ser necesario un amortiguador más duro.

Relativamente pocos materiales se han encontrado convenientes como amortiguadores. Para amortiguadores blandos, la madera y el asbesto son los más comunes. Los amortiguadores duros, usualmente consisten en discos alternados de aluminio y micarta,

aunque ya se han producido y usado otros materialmente semejantes a la micarta. Estos materiales pueden ser baratos o poseen larga vida en comparación de su costo. Otros materiales, como la viruta de madera o los cables de acero enrollados, se utilizan frecuentemente, pero no son convenientes, ya que sus propiedades no pueden controlarse. Como los amortiguadores absorben mucha energía, no es raro que los de madera lleguen a arder.

Existen varios materiales para estos elementos, en el caso de amortiguadores superiores, el cálculo de los resortes es  $k = AE / L$ ; donde A es la sección transversal de los amortiguadores, L es la longitud de estos, y; E es el módulo de elasticidad de los mismos.

A continuación se muestran con detalle el módulo de elasticidad y su respectivo coeficiente de restitución:

Tabla 2.6: Valores de Módulos de Elasticidad para Diversos Materiales usados como Amortiguador (Bowles J., 1997)

	<b>MATERIAL</b>	<b>E (tn / cm<sup>2</sup>)</b>
1	Micarta	31.64
2	Roble	3.17
3	Asbesto	2.46
4	Pino	1.76
5	Madera Suave	2.11

### c) Variación de tiempo

El sistema considera una serie de intervalos de tiempo pequeños separados suficientemente para que la onda de esfuerzo solamente viajará de un elemento al siguiente elemento por debajo durante la variación del tiempo, DT. Es necesario elegir una variación de tiempo T adecuado para usarlo en el cálculo por medio de la teoría de la ecuación de onda. Teóricamente las ondas de compresión en un material elástico, como los pilotes, viajan a una velocidad de:

$$V^2 = \frac{E}{\rho} \quad (2.27)$$

Donde  $\rho$  es la densidad de masa. Por lo tanto el tiempo es:

$$T = \frac{D \cdot L}{v} = \frac{D \cdot L}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \quad (2.28a)$$

Siendo  $K_m = AE / DL$  y reemplazando en la ecuación (2.28a) tenemos:

$$T = \sqrt{\frac{W_m}{K_m \cdot g}} \quad (2.28b)$$

Si el intervalo de tiempo es mucho mayor que este valor, llamado Intervalo de Tiempo Crítico ( $T_{CR}$ ) llega a ser inestable. El cabezal y el primer elemento de pilote (con amortiguador inferior) puede tener un tiempo  $T$  diferente que los segmentos del pilote, por lo tanto,  $T$  en general debería ser algo menor de  $T_{CR}$ . Si  $T$  es muy pequeño, tomará muchas iteraciones para completar el cómputo. La teoría de la ecuación de onda aplicada al procedimiento de hincado de pilotes propone usar  $T = T_{CR} / 2$  ó también  $T_{CR} / 2 < T < T_{CR}$ .

Uno debería estar atento si el valor correcto de  $T$  para el sistema es usado, el número de iteraciones debe ser el mínimo; si  $T$  es muy grande, el cálculo suele divergir; si es muy pequeño tomará muchas iteraciones. Es preferible usar un intervalo de tiempo constante que variable en cada elemento debido que este produce convergencias rápidas cuyos resultados no son muy confiables. Se considera efectivo usar intervalos de tiempo que den resultados entre 35 a 60 interacciones.

#### **d) Propiedades del suelo**

Relacionado con el valor de la Deformación Máxima del Suelo (DEMS). A seguir se han propuesto los siguientes valores:

Tabla 2.7: Constante de Amortiguamiento del Suelo en la Punta del Pilote (Bowles J., 1997)

TIPO DE SUELO	Constante de Amortiguamiento en la Punta ( $J_p$ ) seg/m
Arena	0.05 - 0.20
Arena Limosa o Limo Arenoso	0.15 - 0.30
Limo	0.20 - 0.45
Arcilla Limosa o Limo Arcilloso	0.40 - 0.70
Arcilla	0.60 - 1.10

Tabla 2.8: Deformación Máxima del Suelo para ciertos Tipos de Suelo (Bowles J., 1997)

TIPO DE SUELO	DEMS (cm)
Arena	0.10 - 0.50
Arcilla	0.10 - 0.80
Roca	> 0.50

La constante de amortiguamiento friccionante ( $J_s$ ) es usualmente la tercera parte del amortiguamiento por punta ( $J_p$ ). Bowles J. (1997), recomienda un número de ensayos de carga en pilotes tubulares hincados con la punta abierta y concluyó que el suelo taponeado reduce los puntos y tamaños de los valores de iteración en el orden de  $J_p/5$  y  $J_s/5$ .

#### e) Longitud de los segmentos de análisis

Generalmente las longitudes consideradas deberían ser mantenidas entre 2.00 a 3.50 metros. Como se menciona anteriormente con respecto a las variaciones de tiempo, también para el caso de pocos segmentos puede no dar resultados exactos y una cantidad mayor a 12 elementos no aumentarán la exactitud (excepto cuando la longitud del pilote es muy larga y es necesario un mayor número de segmentos). Un pilote corto con una segmentación de longitud pequeña puede generar incrementos significativos en T.



### 2.1.1.2 Sustentación Matemática de la Ecuación de la Onda

La ecuación de onda está basada en el uso de la onda de esfuerzo originada por el martillo de impacto que es resuelta por medio de un análisis numérico. Este método fue el primero en la práctica formal por Smith (1962) y posteriormente por otros investigadores. Lujan E. (2010) realiza una compilación de diversas metodologías de solución de la ecuación de onda aplicada al hincado de pilotes considerando a Simons (1985) con un modelo de movimiento transitorio de las ondas; Clough y Penzien (1975) con un modelo de análisis de superposición modal; Novak (1977, en Lujan E., 2010) con un análisis simplificado con movimiento armónico con ondas transitorias.

A continuación se desarrolla el procedimiento de cálculo establecido por Bowles J. (1997) mediante métodos numéricos:

Para desarrollar los métodos de cálculo se utilizarán los siguientes símbolos:

- A = Área de la Sección Transversal del pilote ( $\text{cm}^2$ )
- Cm = Compresión o desplazamiento relativo del resorte del elemento “m” en  $t=i$  (cm)
- Cm' = Compresión o desplazamiento relativo del resorte del elemento “m” en  $t=i - 1$  (cm)
- Dm = Desplazamiento del elemento “m” en  $t=i$  (cm)
- D'm = Desplazamiento del elemento “m” en  $t=i-1$  (cm)
- D''m = Desplazamiento del elemento “m” en  $t=i-2$  (cm)
- Dsm = Desplazamiento del plástico del suelo en  $t=i$  (cm)
- Dsm' = Desplazamiento del plástico del suelo en  $t=i-1$  (cm)
- E = Módulo de elasticidad del pilote ( $\text{Tn/cm}^2$ )
- Ef = Eficiencia del Martillo o Martinete.
- g = Aceleración de la gravedad ( $g = 9.807 \text{ m/seg}^2$ )
- i-1 = Intervalo de tiempo de antes de  $t = i$  (actual)
- Jp = Constante de amortiguación de la punta del pilote (s/m)
- Js = Constante de amortiguación debido a la fricción (s/m)
- Km = Constante de resorte del segmento del pilote incluyendo cabezal, amortiguador superior e inferior. ( $\text{Tn/cm}$ )
- K'm = Constante de resorte del suelo ( $\text{Tn/cm}$ )

DL = Longitud del segmento del pilote (m)

M, m = Masa

DEMS = Deformación Elástica Máxima del Suelo (cm)

DT = T = Intervalo de Tiempo usado en calculo (seg)

$\ddot{u}$  = Segunda derivada del desplazamiento “u” con respecto al tiempo.

$V_m$  = Velocidad del elemento “m” en  $t=i$  (m/s)

$V_m'$  = Velocidad del elemento “m” en  $t = i-1$  (m/s)

Consideramos la ecuación de onda como el análisis de la ecuación diferencial de impacto en una varilla delgada sujeta a la resistencia lateral R, como muestra la Figura 2.9, la unidad de deformación es:

**a) Determinación de la Ecuación de la Onda**

$$e = \frac{\partial u}{\partial y} \tag{2.29}$$

La fuerza de la parte superior del elemento se calcula de la siguiente manera:

$$P_t = E \cdot A \cdot e = E \cdot A \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \tag{2.30}$$

La fuerza en la parte inferior del elemento se calcula de la siguiente manera:

$$P_b = \left[ e + \frac{\partial e}{\partial y} \Delta y \right] \cdot E \cdot A = E \cdot A \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Delta y \right) \tag{2.31}$$

La fuerza neta que produce la aceleración en el elemento es:

$$P_{net} = P_t - P_b \pm R \tag{2.32a}$$

Reemplazando los valores de las Ecuaciones (2.30) y (2.31):

$$P_{net} = E \cdot A \cdot \frac{\partial u}{\partial y} - E \cdot A \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial y} \right) \pm R$$

$$P_{net} = E \cdot A \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \pm R \quad (2.32b)$$

La fuerza neta no balanceada está determinada por:

$$P_{net} = M \cdot a = \frac{W}{g} \cdot a = \frac{W}{g} \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \quad (2.32c)$$

Además:

$$\rho = \frac{W}{g \cdot A \cdot \partial y} \quad (2.32d)$$

Reemplazando en las ecuaciones anteriores:

$$\left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \left( \frac{E}{\rho} \right) \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \pm R \cdot \left( \frac{g}{W} \right) = 0 \quad (2.33)$$

Esta es la ecuación diferencial de la ecuación de la onda, la cual tiene diferentes formas de resolver.

### b) Efecto de Resorte o Amortiguación

La fuerza del resorte en el elemento diferencial de la ecuación 2.33 es:

$$R = K_1^* \cdot u \cdot \partial y + K_2^* \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right) \cdot \partial y \quad (2.34)$$

En esta fórmula se observa el efecto del resorte elástico del suelo,  $K^*_1$ , y el amortiguamiento del suelo,  $K^*_2$ , que se encuentran en paralelo. Así es que en la ecuación (2.43) se considera la naturaleza visco elástica del suelo.

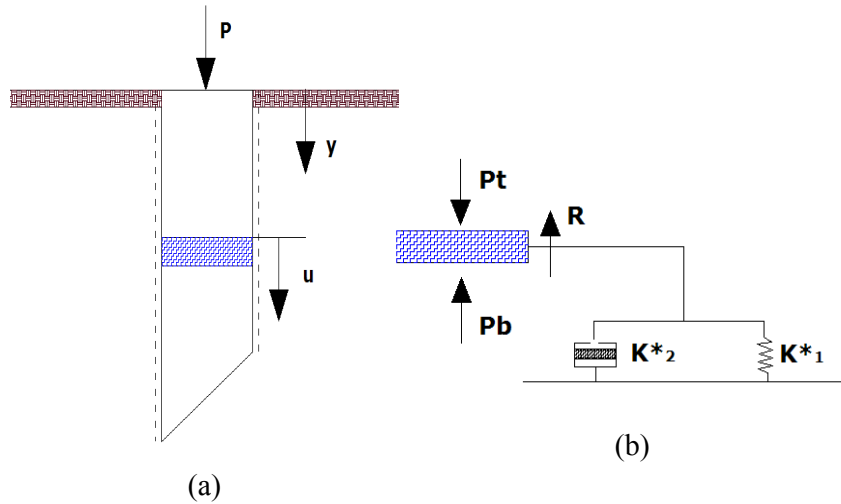


Figura 2.9: Transmisión de esfuerzos considerando la naturaleza elástica del pilote y visco elástica del suelo

Con respecto a la ecuación (2.33) existen soluciones teóricas mediante aproximaciones numéricas, que se muestran muy eficientes siempre que se obtengan datos precisos, lo cual es casi imposible en una prueba de campo, debido a las limitaciones mencionadas. Así es que en la presente investigación se mantendrá un rango confiable de aproximación mediante el uso de un modelo físico de resortes visco elásticos.

Se plantea expresar  $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$  en diferencias finitas usando el método de diferencias finitas de dos pasos atrás, como se muestra:

$$y''_n = \frac{y_n - 2y_{n-1} + y_{n-2}}{(\partial x)^2} \quad (2.35)$$

Cambiando los términos con los mostrados anteriormente se obtiene:

$$\frac{Dm - 2Dm' + Dm''}{T^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.36a)$$

Donde:

$Dm$  = Desplazamiento de los elementos (m) en  $t=(1)$  intervalos de tiempo

$Dm'$  = Desplazamiento de los elementos (m) en  $t=(t-1)$  intervalos de tiempo

$Dm''$  = Desplazamiento de los elementos (m) en  $t=(t-2)$  intervalos de tiempo

$T$  = Intervalo de Tiempo

$F_{am}$  = Fuerza Acelerante en cualquier elemento (m)

Realizando una multiplicación en ambos lados de la ecuación por  $T^2$  se muestra:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \cdot T^2 = F_{am} \cdot \left( \frac{g \cdot T^2}{W_n} \right) \quad (2.36b)$$

Relacionando las ecuaciones (2.36a) y (2.36b) resulta:

$$Dm - 2Dm' + Dm'' = F_{am} \cdot \left( \frac{g \cdot T^2}{W_n} \right) \quad (2.37)$$

### e) Modelo Teórico del Comportamiento de la Onda en un Pilote

El modelo teórico supone que el pilote está compuesto por una serie de elementos (Fig. 2.30), cada uno de peso  $W_n$ , conectados por un resorte de rigidez,  $K$ ; asociados a propiedades elásticas del material, y la resistencia en las caras del pilote, que amortiguan las vibraciones, se suponen de naturaleza visco elásticas, con una constante  $K'$  representando la características de los suelos.

Para el desarrollo de este modelo teórico en la solución del problema específico, debe introducirse la velocidad del martillo en el impacto, así como valores numéricos de todos los pesos, rigideces, factores de amortiguamiento y resistencias. Sin embargo usualmente no es necesario asignar valores numéricos específicos a la resistencia de la punta y a la

resistencia lateral por fricción. Solo es necesario estimar la fracción de la resistencia total del pilote que va a desarrollar la punta y suponer la ley en que la resistencia lateral está distribuida a lo largo del pilote.

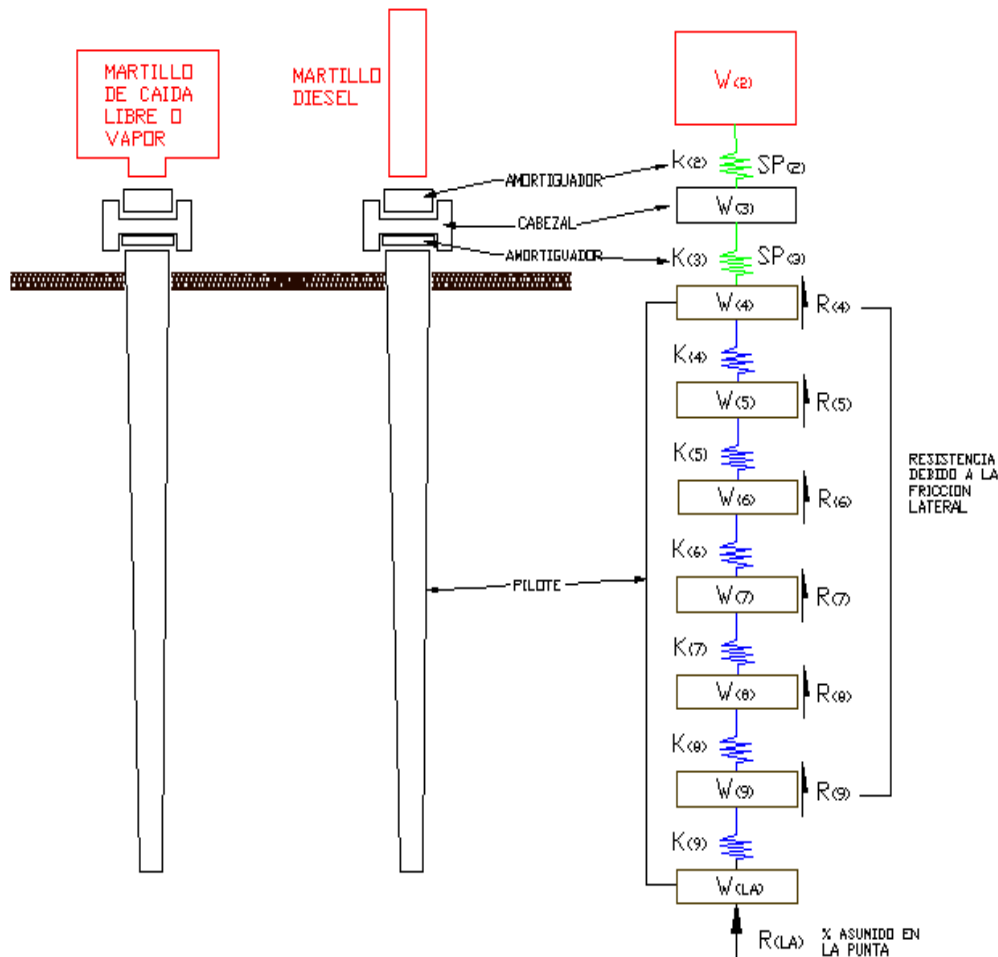


Figura 2.30: Modelo numérico usado en el análisis de la ecuación de onda

La ecuación de onda puede ser usada para determinar:

- Compatibilidad de Equipamiento: Si el pilote puede ser hincado usando la combinación martillo-pilote dado.
- Capacidad del Pilote: Si el pilote alcanzará la capacidad de carga última deseada usando estimados de la capacidad de carga última y obteniendo resultados en golpes/10 cm.

- Esfuerzos de Hincado: Que los valores de los esfuerzos de hincado no excedan los esfuerzos permitidos en el pilote.

Este método reemplaza la ecuación diferencial describiendo una onda de choque a lo largo del pilote por un equivalente numérico. (Figura 2.31)

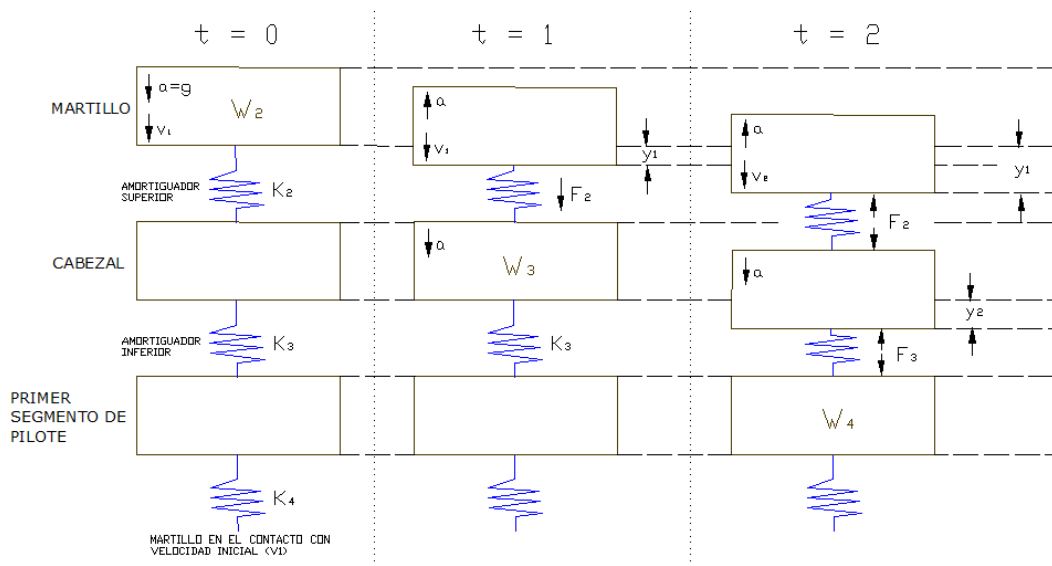


Figura 2.31: Análisis de la Ecuación de Onda Mediante Incrementos De Tiempo.

Dicho método es descrito a continuación:

- En el principio cuando ( $t=1$ ), el martinete ( $W_2$ ) impacta sobre el soporte con una velocidad inicial ( $V_{2,1}$ ) o el  $V_1$  en la Figura 2.30.
- Esta velocidad  $V_{2,1}$  desplaza el resorte del amortiguador superior SP(2) en el fin del primer intervalo en  $D_{2,2}$  de acuerdo con la ecuación:

$$y_1 = v_1 \Delta t \quad (2.38)$$

- Este desplazamiento produce una fuerza en el amortiguador superior ( $F_{2,2}$ ) calculado como:

---

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{y}_1 \quad (2.39)$$

D. La fuerza  $F_{2,2}$  acelera hacia abajo el cabezal ( $W_3$ ) de acuerdo a:

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{a} \quad (2.40)$$

Ningún otro evento importante ocurre durante este intervalo.

E. Al final del siguiente intervalo ( $t=2$ ):

E.1. El amortiguador superior se movió una distancia, debido a la velocidad ( $v_2$ ), equivalente a:

$$\mathbf{y}_2 = \mathbf{v}_2 \cdot \Delta \mathbf{t} \quad (2.41)$$

E.2. El cabezal se mueve una distancia basado en la aceleración producido por  $F_{2,2}$  para obtener una velocidad de:

$$\mathbf{v}_3 = \mathbf{a} \cdot \mathbf{t} \quad (2.42)$$

El cual produce un desplazamiento ( $D_{3,2}$ ) de:

$$\mathbf{y}_3 = \mathbf{v}_3 \cdot \Delta \mathbf{t} \quad (2.43)$$

E.3 Resultando una nueva fuerza en el amortiguador superior debido al desplazamiento neto ( $y_1 - y_2$ ) para obtener dicha fuerza como:

$$\mathbf{F}_{2,2} = \mathbf{K}_2 \cdot (\mathbf{y}_1 - \mathbf{y}_2) \quad (2.44)$$

E.4. Y también resulta una fuerza ( $F_{3,2}$ ) entre el cabezal y el primer segmento del pilote basado en el desplazamiento  $y_2$  y en la constante del resorte del primer segmento del pilote  $k_3$  ( $SP_3$ ) como una fuerza ( $F_3$ ) de la Figura 2.31.



$$F_{3,2} = K_3 \cdot y_2 \quad (2.45)$$

Este proceso continua para todos los elementos con sus resortes y resistencias de suelo incluyendo la punta obteniendo la información deseada para cada intervalo de tiempo.

Analizando la Figura 2.32a, el desplazamiento instantáneo  $D_m$  de cualquier elemento es la suma del desplazamiento instantáneo de una unidad de tiempo atrás ( $D_m'$ ) mas el producto de la velocidad instantánea del elemento en el intervalo de tiempo:

$$D_m = D_m' + V_m \cdot T \quad (2.46)$$

Y la compresión neta del elemento (Figura 2.32b) es calculada como:

$$C_m = D_m + D_{m-1} \quad (2.47)$$

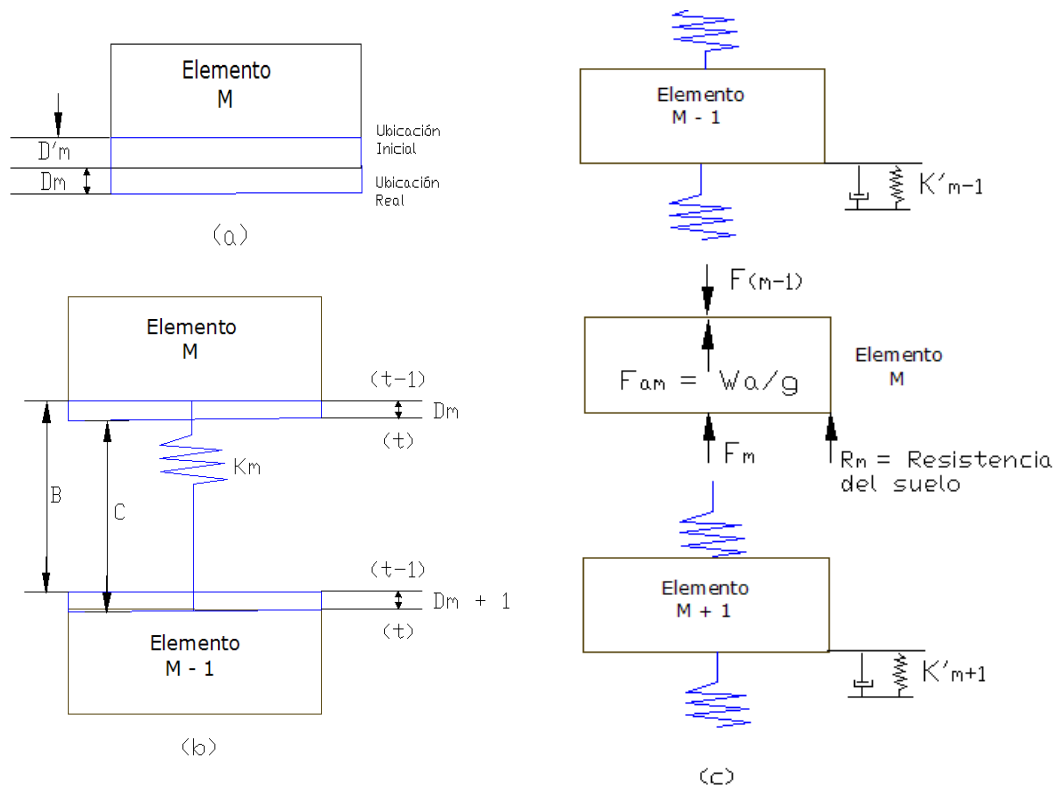


Figura 2.32: Fuerzas y Desplazamientos de Elementos

La fuerza resultante en el resorte del elemento  $K_m$  es:

$$F_m = K_m * C_m \quad (2.48)$$

La fuerza acelerante  $F_{am}$  en cualquier elemento,  $m$ , es:

$$\begin{aligned} -F_{m-1} + F_{am} + F_m + R_m &= 0 \\ F_{am} &= F_{m-1} - F_m - R_m \end{aligned} \quad (2.49)$$

La velocidad del elemento,  $m$ , es calculado de la ecuación de la velocidad:

$$V = V_0 + at \quad (2.50)$$

El cual llega a ser en este caso (desde que  $a = \frac{F_{am}}{m}$  ó  $a = \frac{F_{am} \cdot g}{W_m}$ ):

$$V_m = V_m' + F_{am} \cdot \left(\frac{g}{W_m}\right) \cdot T \quad (2.51)$$

La ecuación final general del elemento-desplazamiento puede ser obtenido multiplicando la ecuación (2.51) por  $T$ , para obtener:

$$V_m \cdot T = V_m' \cdot T + F_{am} \cdot \left(\frac{g}{W_m}\right) \cdot T^2 \quad (2.52a)$$

Reordenando la primera ecuación tenemos:

$$V_m T = D_m + D'_m \quad (2.52b)$$

Y por analogía:

$$V_m' T = D'_m + D''_m \quad (2.52c)$$

Reemplazando en la ecuación (2.52a) tenemos:

$$D_m = 2 \cdot D_m' - D_m'' + F_{am} \cdot \left(\frac{g}{W_m}\right) \cdot T^2 \quad (2.52d)$$

Esta ecuación es la aproximación por métodos numéricos que son base por la cual son desarrollados varios programas de cómputo utilizados en el medio.

#### d) Aspectos Importantes del Modelo Teórico

Las velocidades de los elementos del pilote pueden calcularse como:

$$V_m = V_m' + (F_{m-1} \cdot F_m \cdot R_m) \left(\frac{g}{W_m}\right) \cdot T \quad (2.53)$$

Y la fuerza  $F_m$  es:

$$F_m = (D_m - D_{m+1}) K'm \quad (2.54)$$

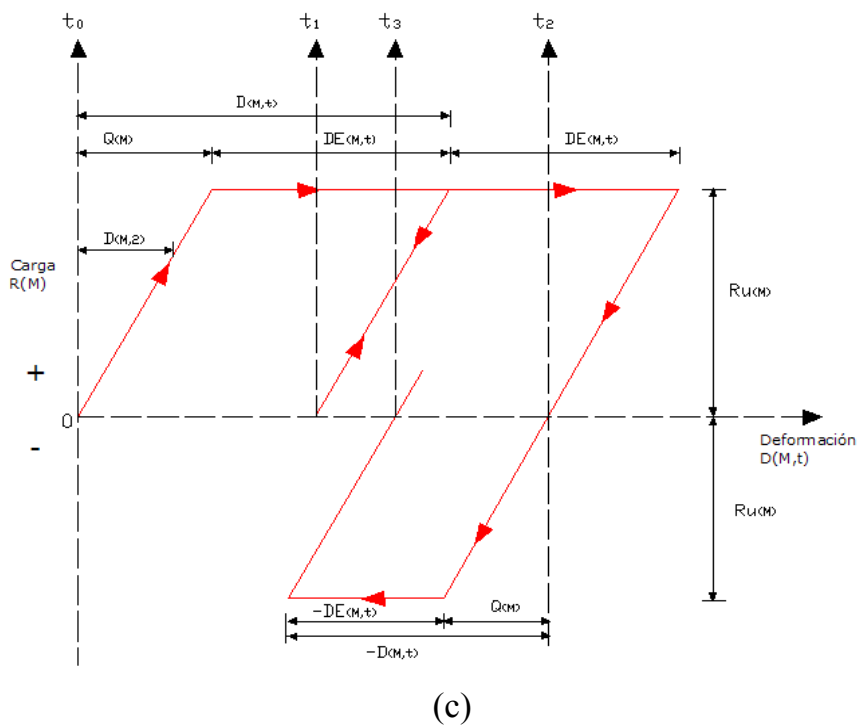
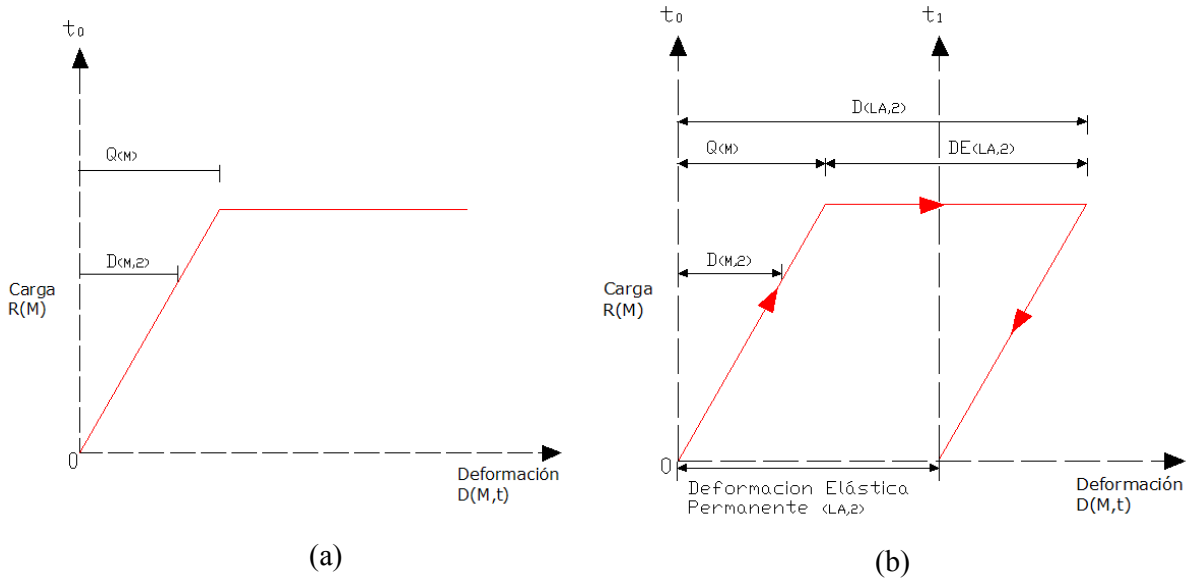
La resistencia última del pilote  $R_u$  puede ser distribuido de alguna manera a los elementos del pilote de tal forma que la suma de resistencias de cada elemento resulte  $R_u$ . La distribución puede basarse en el porcentaje de carga estimada llevada por la resistencia en el lado friccionante y la punta.

La amortiguación aportada por el suelo idealizada como resorte es calculado como:

$$K'm = \frac{R_{UM}}{DEMS} \quad (2.55)$$

Es recomendable que el primer segmento de pilote no adquiera resistencia de suelo debido al hincado y otras perturbaciones de superficie.

Las resistencias instantáneas de los elementos del pilote son calculados como se muestra en la siguiente figura:



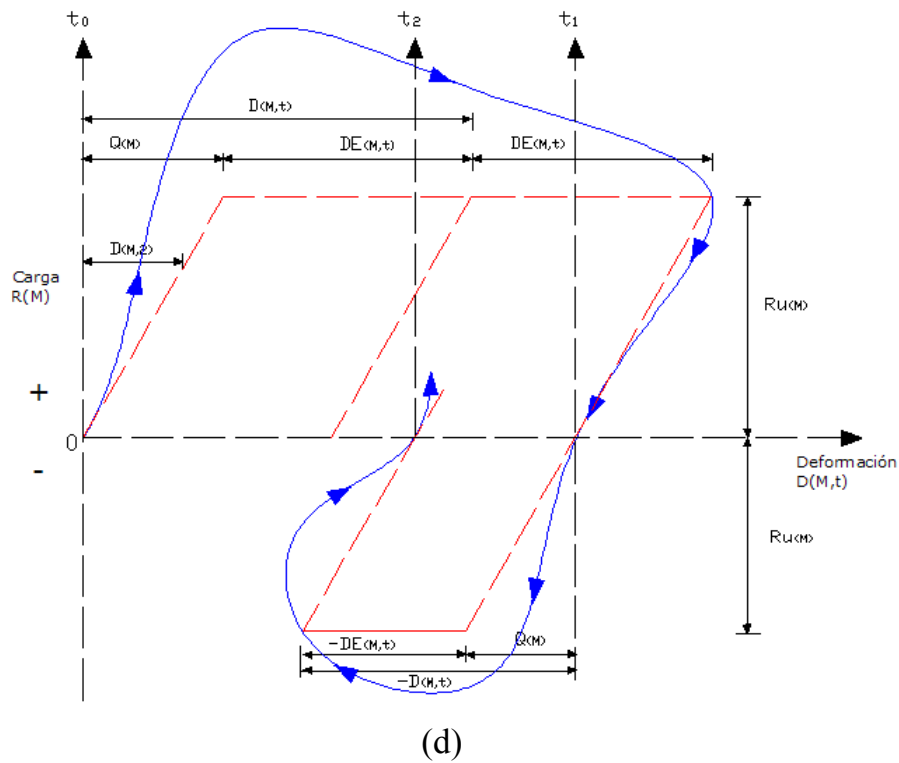


Figura 2.33: Deformación Plástica del Suelo

Denominando  $D_{SM}$  a la deformación plástica en la cara del pilote definida como la cantidad en exceso de  $D_M$ , tenemos:

$$D_{SM} = + D_M \pm DEMS \quad (2.56a)$$

O usando la aproximación:

$$D_M - DEMS \leq D_{SM} \leq D_M + DEMS \quad (2.56b)$$

Desde que  $D_M$  puede ser también (+) ó (-). Con la deformación plástica del suelo evaluada, la deformación elástica es la deformación total menos la deformación ó

$$D_0 = D_M - D_{SM} \quad (2.56c)$$

Y la resistencia elástica del suelo es:

$$\mathbf{R}_0 = (\mathbf{D}_M - \mathbf{D}_{SM}) \mathbf{K}'_M \quad (2.57a)$$

Pero teniendo en cuenta el amortiguamiento (Fig. 2.33d) se modifica la ecuación. Esto es logrado por asumir que  $R_M$  es la suma de dos resistencias, elásticas y amortiguamiento, el cual puede ser escrito como:

$$\mathbf{R}_M = \mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_d \quad (2.57b)$$

Y asumiendo más aun que la resistencia al amortiguamiento puede ser escrita como:

$$\mathbf{R}_d = \mathbf{R}_0 \mathbf{J}_S \mathbf{v}_m \quad (2.57c)$$

Esta ecuación está en función de la velocidad del elemento, la resistencia elástica y factor de amortiguamiento. Realizando una combinación de los términos tenemos:

$$\mathbf{R}_M = (\mathbf{D}_P - \mathbf{D}_{SP}) \cdot \mathbf{K}'_P \cdot (\mathbf{1} + \mathbf{J}_S \mathbf{V}_m) \quad (2.58a)$$

Se debe notar que para una carga en la punta del pilote de 100% se tiene ( $K'_m = 0$ ) y ningún amortiguamiento ocurre aun si  $J_m$  es diferente de "0".

Para la resistencia en la punta por analogía se tiene:

$$R_P = (D_P - D_{SP}) \cdot K'_P \cdot (1 + J_P V_P) \quad (2.58b)$$

La definición de  $D_{SM}$  y  $D_{SP}$  limitan al desplazamiento elástico en la ecuación 2.58a:

$$\mathbf{D}_M - \mathbf{D}_{SM} \leq \mathbf{D}_{EMS}$$

Para la punta del pilote es evidente que  $D_{SP}$  es un resultado permanente y ninguna inversión de signos es posible, así como en la resistencia en la cara, por tanto tiene que ser verificado usando la siguiente condición (Ver Figura 2.33b):

$$D_{SP} \geq D_{SM} - DEMS$$

Desarrollando un modelo idealizado de la resistencia de suelo de un pilote según las Figuras 2.33 (a, b, c y d); no incluyen amortiguamiento:

- **En la Figura 2.33a:**  $D_{(M,2)} < DEMS$ : Desplazamiento de Elementos es menos que el DEMS.
- **En la Figura 2.33b:** Desplazamiento por Punta es mayor que DEMS, cuando el desplazamiento de la punta  $D_{(LA,2)}$  es menor que DEMS usa la ecuación (2.58a).
- **En la Figura 2.33c:** Desplazamiento general idealizado para el elemento “m”. Al principio del registro el tipo y desplazamiento serán “0”. El desplazamiento llega a  $D_{(M,2)}$  entonces se tiene  $Ru_{(M)} = DEMS(K'm)$ , entonces ocurre la deformación plástica ( $DE_{M,2}$ ). Las condiciones de suelo varía de la posición al final del primer intervalo de tiempo. Para el próximo intervalo, se repite el mismo ciclo anterior hasta el fin de  $DT=2$ . Después se muestra la variación de un desplazamiento negativo pero solo de las caras del elemento del pilote (no puede haber desplazamiento negativo para la punta), según  $DT=3$ . El cuarto intervalo de tiempo empieza del desplazamiento inicial.
- **En la Figura 2.33d:** Se considera la situación general mostrada en las figuras anteriores pero con el amortiguamiento incluido.

Los amortiguadores del martillo y del pilote son factores importantes en el análisis, estos pueden considerarse como resortes que tienen un módulo igual a su rigidez como columna  $AE/L$ , donde A y L son respectivamente el área de la sección transversal y la altura del amortiguador, y E es el módulo de elasticidad. Estos son datos muy importantes para determinar el módulo del resorte. Generalmente el amortiguador superior (e inferior) descansa sobre la cabeza del pilote y unidos de tal forma que ellos solo transmiten fuerzas de compresión. (Ver Figura 2.34)

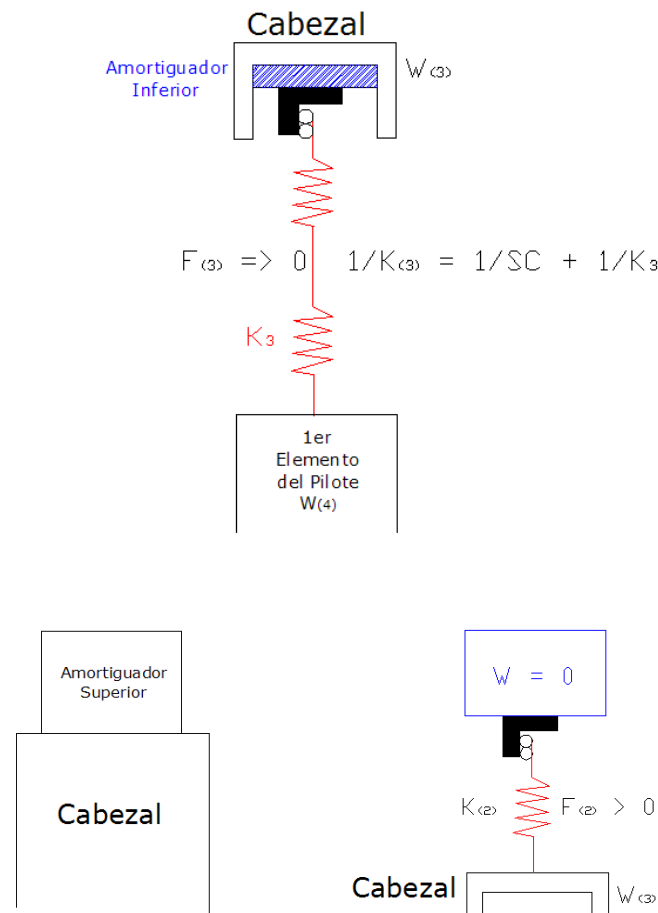


Figura 2.34: Idealización del Sistema Amortiguador – Martillo – Pilote

Desde que el amortiguador superior (e inferior) son de material diferente al martillo o el cabezal, surge el interés de conocer la pérdida de energía en el impacto del martillo. La energía puede ser representada en la Figura 2.35 donde se aprecia el diagrama Fuerza-Desplazamiento, donde el área ABC es energía de entrada. De la ecuación de energía (tipo de impulso):

$$e (M_1 V_i + M_2 V_i) = M_1 V_f + M_2 V_f' \quad (2.59a)$$

Donde:

M<sub>1</sub> = Masa del Martillo



$M_2 = \text{Masa del Amortiguador Superior} = 0$

$V_1, V_2 = \text{Velocidades Iniciales (} V_1 = 0 \text{ para } M_2)$

Por lo tanto:

$$e = V_f / V_i \rightarrow e^2 = V_f^2 / V_i^2$$

La ecuación de la energía cinética es:

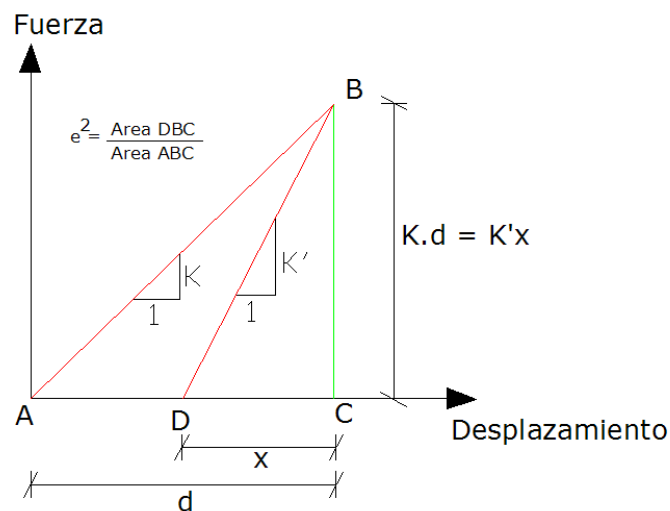
$$K_e = \frac{1}{2} M v^2 \tag{2.59b}$$

Es evidente que en la Figura 2.35a:

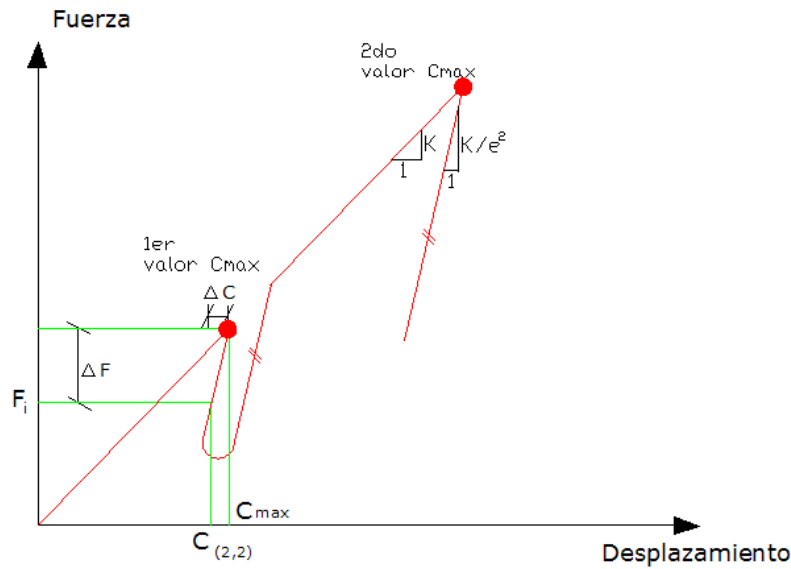
$$e^2 = V_f^2 / V_i^2 = \text{área DBC} / \text{área AB} \tag{2.59c}$$

Referente a la Figura 2.35b, el cual representa la fuerza de deformación de resorte con restitución, calculamos las fuerzas del resorte del amortiguador superior como:

$$F = K C_2 \tag{2.59d}$$



(a)



(b)

Figura 2.35: Diagrama Fuerza vs Desplazamiento para el Amortiguador Superior e Inferior

Hasta que el cambio en compresión ( $C_2 - C'_2$ ) entre los dos intervalos de tiempo sea negativo. En este tiempo un  $C_{max}$  es introducido:  $C_{max} = C'_2$  y la fuerza instantánea del amortiguador superior ( $F_i$ ) es calculado como:

$$F_i = K.C_{max} + K \left( \frac{C - C_{max}}{e^2} \right) \quad (2.59e)$$

La ecuación (2.59e) es usado hasta que  $(C_2 - C'_2) \geq 0$ , entonces la ecuación (2.59d) es usado nuevamente, este ciclo se realiza las veces que sea requerido.

### e) Valores utilizados en el Modelamiento del Comportamiento del Pilote y Suelo

Para lograr un modelamiento adecuado mediante métodos numéricos (diferencias finitas) es importante tener valores específicos para ciertos comportamientos del pilote y/o suelo:

- Intervalo de Tiempo, este valor es considerado de la práctica en relación con el tipo de material que conforma el pilote para una longitud segmentos o diferenciales recomendados para el cálculo, ver Tabla 2.9:

Tabla 2.9: Intervalo de Tiempo en función al material del pilote

Material del Elemento	Longitud del Segmento (m)	Intervalo de Tiempo
Acero	2.4 - 3.1	0.00025
Madera	2.4 - 3.1	0.00025
Concreto	2.4 - 3.1	0.00033

- Módulos de Elasticidad para Amortiguadores en cabezal de impacto, este valor es considerado de la práctica como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 2.10: Módulo de Elasticidad de Amortiguadores en Cabezal de Impacto (Bowles J., 1997)

Material	E (Mpa)
Micarta	3100
Madera Roble	310
Disco de Asbesto	310
Contraplacado	240
Flexible	205

La Constante de Amortiguamiento a ser utilizado esta en función de (Área x Módulo de Elasticidad / Espesor).

- Desplazamiento dinámico (quake) y Constante de Amortiguamiento Dinámico (damping constant) del Suelo

Los valores típicos de este desplazamiento dinámico (quake) y amortiguador (damping) del suelo en la punta del pilote son los siguientes:

Tabla 2.11: Desplazamiento Dinámico (quake) y Amortiguamiento (damping) del Suelo  
(Bowles J., 1997)

<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Desplazamiento Dinámico - quake (mm)</b>	<b>Amortiguamiento en la Punta (seg/m)</b>
Arena	1.0 - 5.0	0.33 - 0.66
Arcilla	1.0 - 8.0	1.30 - 3.30
Roca	> 5.0	

El amortiguamiento del suelo en la cara lateral del pilote es estimado la tercera parte del obtenido en la punta.

### 2.1.2 Pruebas de Carga a Escala Real en el Lugar.

La manera más exacta de determinar la capacidad de carga axial de la interacción suelo-pilote es la ejecución de pruebas de carga a un pilote definitivo o provisional en las mismas características en la zona del proyecto o en un lugar cercano donde la estratigrafía sea similar.

Los métodos mencionados en secciones anteriores son indirectos y no establecen valores definitivos.

Las pruebas de carga son clasificadas por la forma de aplicación de los esfuerzos al pilote de ensayo de la siguiente manera:

- Prueba Dinámica (PDA)
- Prueba Estática (Método Estándar y Método con Celdas de Osterberg)
- Prueba Statnamic. (Estática-Dinámica)

La presente investigación está centrada en los procesos de prueba de carga en pilotes tipo Estática (Método Estándar) y Dinámica (PDA), estos serán desarrollados a más detalle en los siguientes capítulos.

Por otro lado, a razón de referencia se explicará en qué consisten los otros métodos:

### 2.1.2.1 Prueba Estática con Celdas De Osterberg

Un reciente desarrollo para la evaluación de la capacidad de carga del pilote es la prueba de carga de Osterberg que es un convencional ensayo estático de carga al pilote a compresión desde la cabeza del pilote usando un sistema de reacción o carga muerta. La combinación de resistencia por punta y fricción resiste la carga aplicada a la cabeza del pilote. Por otro lado, en el ensayo Osterberg, el pilote es cargado en compresión, pero la carga es aplicada en la punta del pilote. Como la celda expande, la resistencia por punta provee reacción por la resistencia por fricción y viceversa. El ensayo es completado cuando la resistencia última por fricción o por punta es alcanzada, o la celda alcance su capacidad.

El principio de la operación es simple; este consiste de dos placas (pistones) de cierto diámetro entre las cuales hay una cámara que contiene un líquido presurizado. Las dos placas a su vez están soldadas a dos placas de metal que usualmente son de diámetro del fuste del barrenado. A este arreglo de placas comúnmente se le conoce como la celda Osterberg y se puede apreciar en la Figura 2.36. Esta generalmente se coloca en la base del fuste barrenado junto al acero de refuerzo antes de colocar el concreto. Este arreglo hace innecesario la utilización de un sistema de reacción para llevar a cabo la prueba. Al aplicarse presión a la celda, ésta reacciona hacia arriba contra la resistencia del fuste y hacia abajo contra la resistencia de punta. Esto permite separar que porción de la resistencia se va al fuste y la que se va a la punta.

La carga aplicada al fuste barrenado es monitoreada midiendo la presión del líquido en la cámara. La presión es aplicada por una bomba hidráulica que se concentra en la superficie. La carga aplicada a la celda continúa hasta que se alcanza la capacidad de carga última del fuste, se alcanza la capacidad última de punta, o se alcanza la capacidad máxima de la celda.

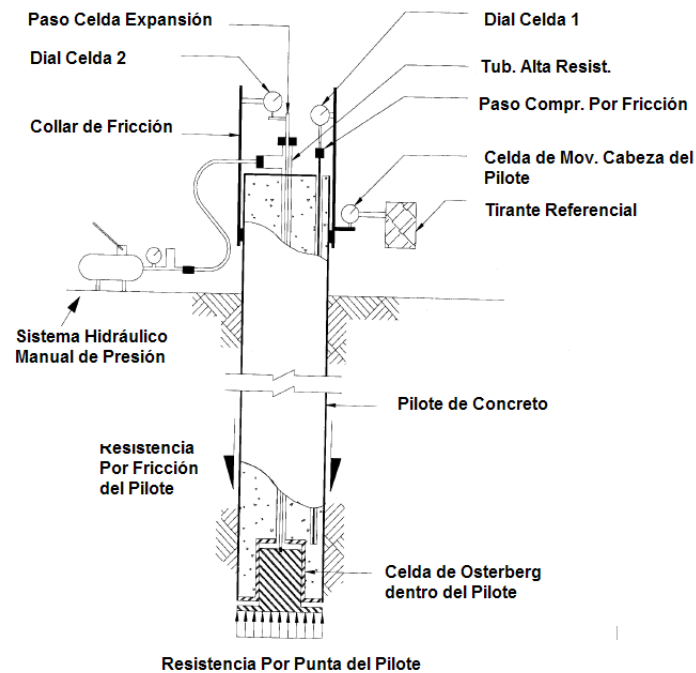


Figura 2.36: Celda de Osterberg y Equipo Relacionado para Ensayos Estáticos en Pilotes



Figura 2.37: Habilidad de una celda Osterberg

### 2.1.2.2 Ensayo Statnamic

Es método mixto de ensayo dinámico de Alta Tensión y Estático por evaluar la capacidad estática de cimentaciones profundas. Este método carga la cimentación por medio de bajas

detonaciones localizadas dentro de una cámara de presión entre la cimentación y una masa, como muestran las Figuras 2.38 y 2.39. La fuerza desde la explosión genera un descendente movimiento en la cimentación, que es monitoreado usando instrumentos de carga y desplazamientos, y la data obtenida de estos instrumentos es impresa directamente como una curva Fuerza-Desplazamiento similar a la que se obtiene en un ensayo de carga estática. La masa provee una reacción para la fuerza.

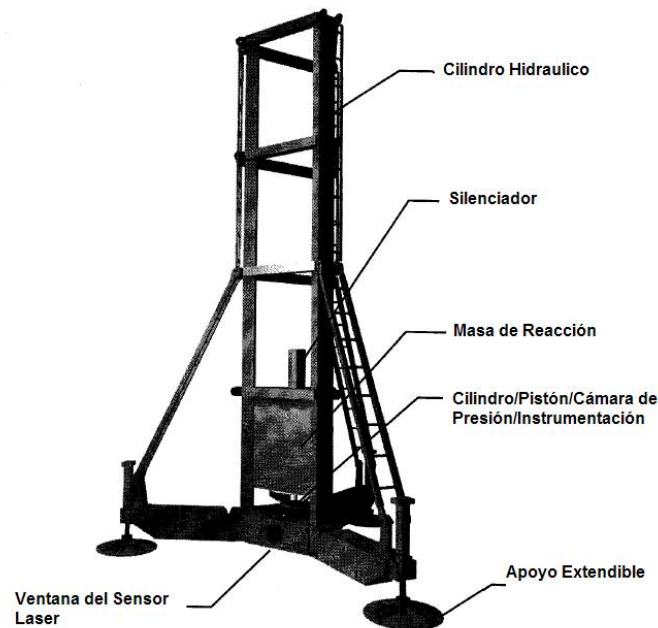


Figura 2.38: Esquema del Mecanismo Hidráulico Statnamic

La carga de un ensayo Statnamic es de mucho más larga duración entre 0.1 – 0.2 seg. que los de un martillo o una masa de caída base de los ensayos de PDA (Ver Figura 2.40a), entonces la cimentación desciende casi como una simple unidad y podría ser analizada como si fuera un cuerpo rígido. Por lo tanto, el ensayo Statnamic no resulta en un modelo de respuesta dinámica. En vez de eso, directamente desarrolla una curva Carga-Desplazamiento, y entonces es conceptualmente similar a un ensayo de carga estática, excepto que se ejecuta más rápidamente. Este rasgo permite también al ensayo ejecutarse sin un conocimiento de la sección o módulo de elasticidad de la cimentación, que es especialmente útil cuando ensayan pilotes pre-excavados.

La curva Fuerza-Desplazamiento obtenida del ensayo es luego ajustada a valores de fuerza de inercia y amortiguamiento en un intento para producir una curva de un “equivalente estático”. Los métodos de reducción atienden a valores por fuerzas de inercia y amortiguamiento. Típicamente, la cimentación se hunde cerca de 5 mm durante los ensayos, que es probablemente suficiente para desarrollar más de la resistencia a la fricción del lugar, pero menos que el asentamiento requerido para movilizar completamente la resistencia por punta. Por lo tanto, el ensayo debería, en principio, ser conservador. Sin embargo, la respuesta estática del suelo discrepa de una respuesta dinámica, la curva Fuerza-Asentamiento obtenida del Statnamic puede discrepar desde que se obtiene de ensayos de carga estática (Ver Figura 2.40b). Como resultado, las capacidades obtenidas del Statnamic puede ser más alto o más bajo que los obtenidos de ensayos de carga estática. Además, el cuerpo rígido asumido podría no ser válido para cimentaciones esbeltas o largas.

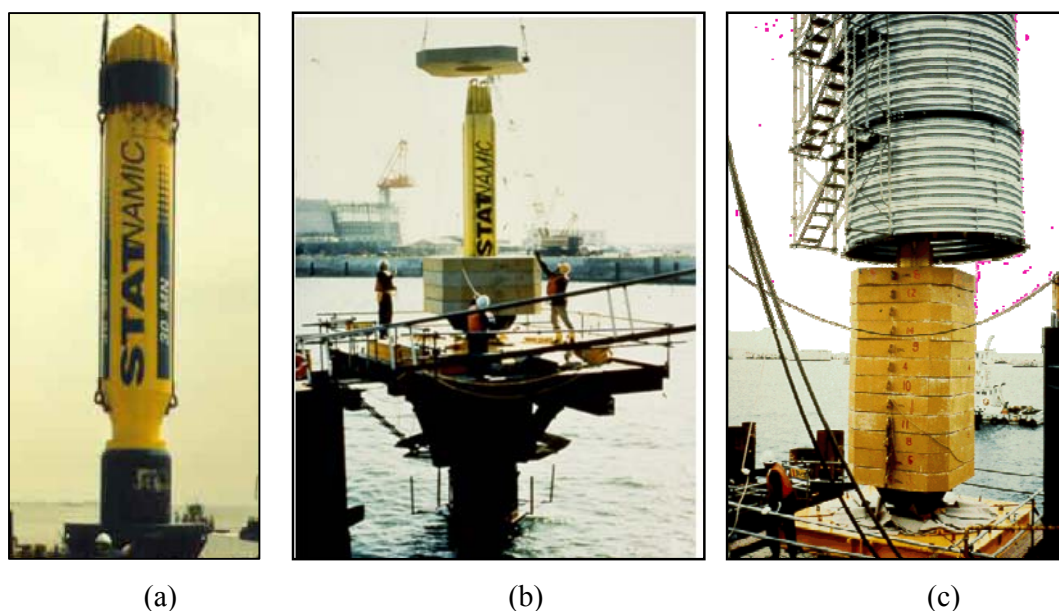


Figura 2.39: Vista del Procedimiento del Ensayo Statnamic

El Ensayo Statnamic también ha sido usado para evaluar capacidades de carga lateral, y esta una alternativa para ensayos de carga estática laterales.



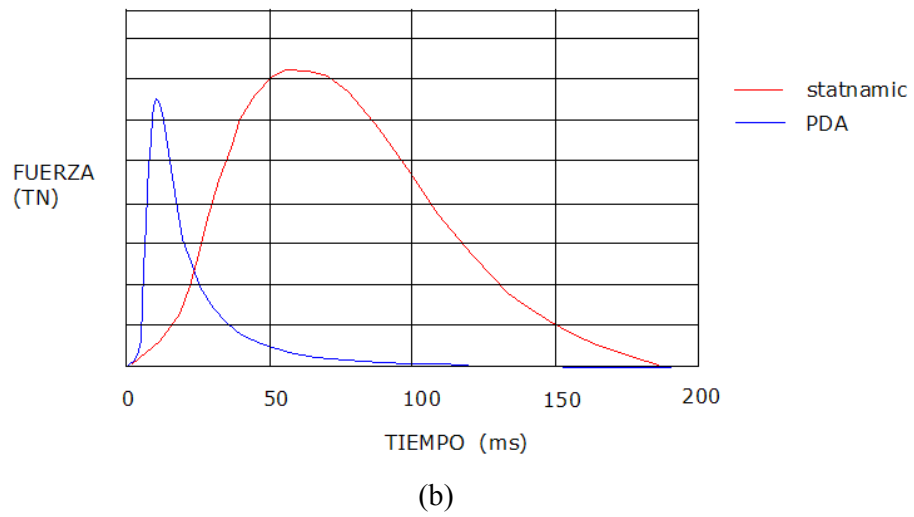
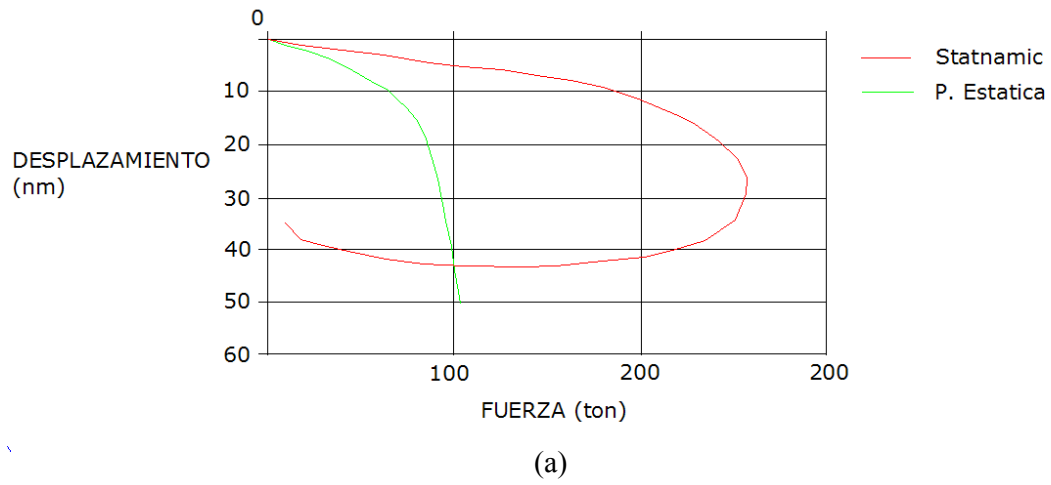


Figura 2.40: Gráfica Comparativa de Fuerza (tn) vs. Tiempo (ms) entre Ensayo Estático y Statnamic (Lara J., 2007)

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA DE ENSAYOS

De acuerdo al alcance y objetivos de la presente investigación se desarrollará a continuación los procedimientos o metodología de ensayos cuyos resultados serán analizados en capítulos posteriores. Estos ensayos monitorean el comportamiento suelo-pilote para cargas axiales a compresión.

Como se mencionó en el capítulo anterior, las pruebas de carga son clasificadas por la forma de aplicación de los esfuerzos al pilote de ensayo, estos se dividen de la siguiente manera:

- Prueba Estática (Método Estándar y Método con Celdas de Osterberg)
- Prueba Dinámica (PDA)
- Prueba Statnamic. (Estática-Dinámica)

Debido al avance en la tecnología aplicada a la ingeniería, estos ensayos son de carga y asentamiento controlado procurando evitar daños innecesarios en el pilote de prueba.

La construcción de cimentaciones profundas, especialmente pilotes hincados o desplazantes, alteran el suelo a su alrededor. Esta alteración algunas veces produce exceso de presiones de poros de agua, que temporalmente altera la capacidad de carga última. Por lo tanto, es mejor dar tiempo para que estos excesos de presiones se disipen antes de iniciar algún ensayo. Esto típicamente requiere un retraso de por lo menos 7 días para arenas y 20 a 30 días en arcillas.

Antes de realizar cualquier ensayo se debe tener identificado los siguientes puntos:

- Identificación de la Carga Requerida por la Superestructura, este tema se vio en el capítulo anterior.

- Establecimiento del Factor de Seguridad o Factor de Reducción, de acuerdo a su metodología de diseño, que sea mínimo aceptable para el proyecto.
- Determinación de los pilotes de ensayo.
- Determinación del tipo de ensayo de carga a ejecutar en el proyecto.
- Determinación del parámetro o método para la obtención de la capacidad última del suelo-pilote.

Durante el ensayo es probable que no se llegue a obtener la capacidad última del pilote, para ello existe normativa y teorías empíricas o semiempíricas que utilizan la curva esfuerzo-deformación estático resultado de los ensayos de carga para establecer dicho valor. Teniendo en cuenta lo indicado en US Army (1991), ABNT (2010), AASHTO (2010) y RNE (2006) se tienen los siguientes parámetros o métodos para la determinación de la capacidad última de la interacción suelo-pilote en base de pruebas de carga:

a) Limitando la Deformación Total del Cabezal

- 25.4mm: Código de New York/ Norma Técnica Holanda/ Reglamento Nacional de Edificaciones E-050 (Perú) – Límite de Seguridad para Edificios en los que no son admisibles grietas/AASHTO (Bjerrum, 1963)
- 15% del Diámetro de la Sección Transversal: ASTM D1143
- 10% del Diámetro de la Sección Transversal: Norma Técnica Reino Unido.
- 8% del Diámetro de la Sección Transversal: Kulhawy, 1983
- Deformación Elástica + Diámetro/30: Norma Técnica Canadá.
- Deformación Elástica + (4mm + Diámetro/30): Norma Brasileira NBR/ PDCA.
- Deformación Elástica + (Diámetro/30): US Army (Pilotes de diámetro mayor a 600mm).
- Deformación Elástica + (3.8mm + Diámetro/120): Método Davisson / US Army (Pilotes de diámetro menor a 600mm).

La deformación elástica del pilote es definida por la ecuación:

$$\Delta = \frac{P \cdot L}{A \cdot E} \quad (3.1)$$

Donde:

$\Delta$  = Deformación Elástica en el Cabezal del Pilote

P = Carga Aplicada al Pilote

L = Longitud de Empotramiento

A = Área de la Sección Transversal Llena del Pilote

E = Modulo de Elasticidad del Material del Pilote

b) Limitando la Deformación Plástica

- 0.25 pulgadas (AASHTO, New York, Louisiana)
- 0.50 pulgadas (Boston)

c) Limitando la Relación: Deformación Plástica/Elástica

1.5 (Christiani and Nielson, Dinamarca)

d) Limitando la Relación: Deformación / Carga Unitaria

- Total: 0.01 pulgada/ton (California, Chicago)
- Incrementos: 0.03 pulgada/ton (Ohio)  
0.05 pulgada/ton (Raymond International)

e) Limitando la Relación: Deformación Plástica / Carga Unitaria

- Total: 0.01 pulgada/ton (Ciudad New York)
- Incrementos: 0.003 pulgada/ton (Raymond International)

La presente investigación está centrada en los procesos de prueba de carga en pilotes de tipo Estática (Método Estándar) y Dinámica (PDA), éstas se desarrollarán a continuación:

### 3.1 PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICA PARA PILOTES (PCE)

La prueba axial de carga estática tradicional para pilotes está estandarizada bajo la Norma ASTM D1143 “Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load” o equivalente.

Dentro de este procedimiento, existen dos tipos de aplicación de la carga más usados: Ensayo de Carga Mantenido (Maintained Load (ML) Test) y Ensayo de Relación de Penetración Constante (Constant Rate of Penetration (CRP) Test). En la presente investigación se utilizó el primero de estos para los ensayos ejecutados.

De acuerdo a esta norma, la falla de la interacción suelo-pilote ocurre cuando existe un desplazamiento de ensayo en el nivel monitoreado (nivel de cabezal o superior de pilote) mayor al 15 % del diámetro o diagonal de la sección transversal del pilote.

Este ensayo da como resultado una Curva Carga vs Deformación donde se aprecia el comportamiento de la interacción suelo-pilote bajo cargas axiales, por ejemplo ver Figura 3.1.

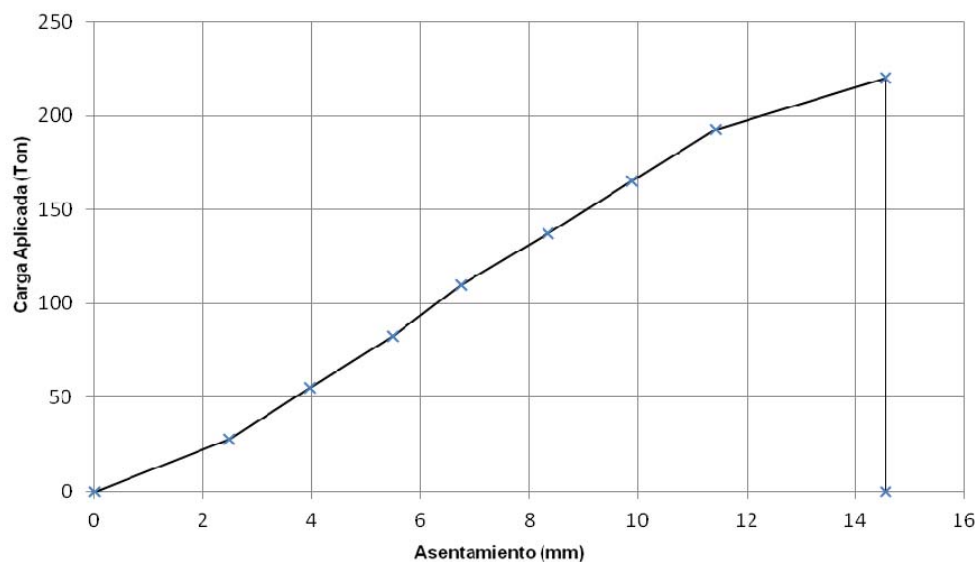


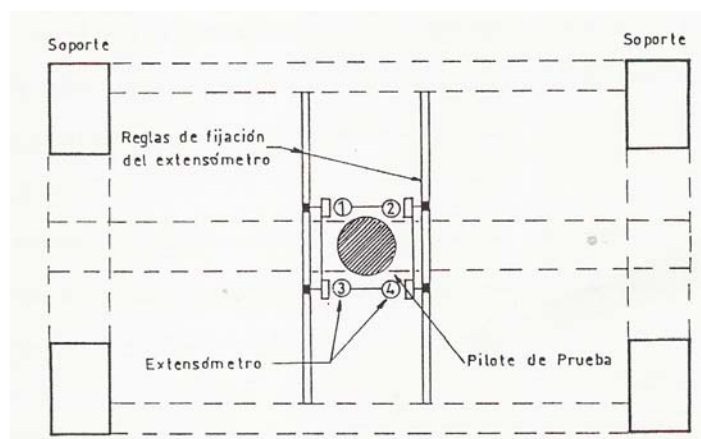
Figura 3.1: Curva Carga vs Deformación para Carga de Ensayo 220 ton en Rioja, San Martín, Perú

### 3.1.1 Sistema de Reacción, Aplicación de la Carga y Medición de Desplazamiento.

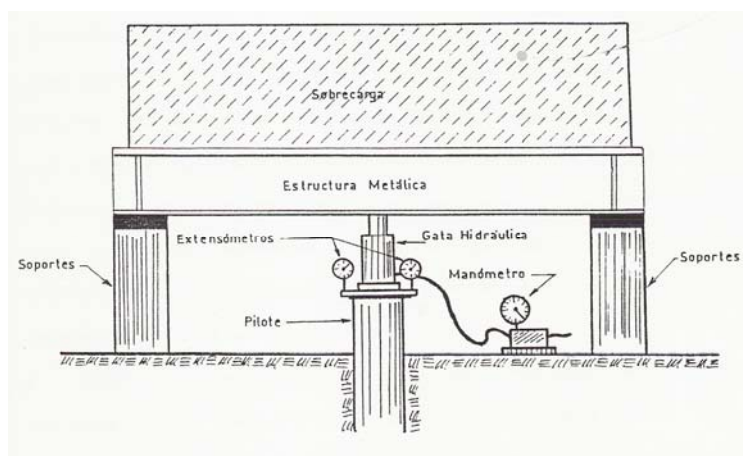
El sistema de Reacción tiene el objetivo de garantizar la aplicación de la carga axial a compresión en el pilote durante el ensayo.

El sistema de Aplicación de Carga en este tipo de ensayo es un sistema de cilindros hidráulicos que es colocado en el cabezal del pilote. Para poder generar el apropiado esfuerzo axial y provocar un desplazamiento del pilote, se requiere un sistema de reacción o estructura base que impida el movimiento en el otro sentido de la aplicación de la carga.

La medición del desplazamiento durante el ensayo está basado en la distribución de tres extensómetros o relojes de medición (dial gages), con carrera de los diales por lo menos 50mm (2 pulgadas), lectura a un mínimo 0.025 mm (0.001 pulgadas) y con precisión a 0.25 mm (0.01 pulgadas), apoyados alrededor del pilote en elementos separados al sistema de reacción y carga para impedir alteraciones de valores en el movimiento de la interacción de estos sistemas.



(a) Vista de Planta



(b) Vista Frontal

Figura 3.2: Esquema de Prueba de Carga Estática a Compresión con Pilotes de Reacción

El sistema de Reacción está formado por una estructura anclada o fijada al terreno que estabiliza la carga aplicada e impide la reacción negativa en el momento del ensayo. Se diseña un entramado o viga suficientemente rígida para que el esfuerzo aplicado sea transmitido hacia el pilote. Los sistemas de reacción pueden ser de tres tipos:

a) Con Pilotes de Reacción

Se utilizan pilotes definitivos o provisionales alrededor del pilote de ensayo con la suficiente capacidad a tracción que impida el desplazamiento inverso o la pérdida de carga aplicada.



Figura 3.3: PCE a Compresión con Pilotes de Reacción para Carga de Ensayo 240 ton en Rioja, San Martín, Perú

b) Con Contrapeso

Se utiliza un peso sobre el sistema de aplicación de carga (cilindros hidráulicos) para impedir el levantamiento de la estructura. Este peso utilizado debe ser un 10% mayor a la carga máxima de ensayo.



Figura 3.4: PCE a Compresión con Contrapeso para Carga de Ensayo 70 ton en Chimbote, Ancash, Perú

c) Mixto (Pilotes de Reacción + Contrapeso)

En algunos casos se utiliza un sistema de pilotes y peso muerto que conjuntamente trabajan para evitar el desplazamiento inverso o pérdida de carga aplicada durante el ensayo. Este sistema trabaja en primer lugar el contrapeso hasta un desplazamiento negativo mínimo donde empieza a trabajar los pilotes a tracción hasta soportar conjuntamente el esfuerzo.



Figura 3.5: PCE a Compresión con Contrapeso + Pilotes de Reacción para Carga de Ensayo 80 ton en Iquitos, Loreto, Perú



A continuación se muestra el proceso y los sistemas utilizados para los ensayos de carga estática:



- (a) Sistema de Reacción con dos niveles de vigas rígidas y ancladas a cuatro pilotes de reacción.



- (b) Sistema de Aplicación de Carga en base de cilindros hidráulicos, monitoreado con manómetro, apoyados en un cabezal para ensayo.



- (c) Sistema de Medición de Desplazamiento en base a extensómetros o relojes de medición apoyados en vigas independientes y controlando el cabezal para ensayo.

Figura 3.6: Procedimiento de Prueba de Carga Estática (PCE) a Compresión con Pilotes de Reacción

### 3.1.2 Ensayo de Carga Mantenido (Maintained Load (ML) Test)

En un ensayo de Carga Mantenido, la carga es aplicada en incrementos, requiere mantener cada una de esas cargas hasta que el pilote detenga su movimiento o hasta una relación de movimiento aceptablemente pequeño. Este criterio requerirá soltar cada carga por lo menos 1 o 2 horas, algunas veces más, entonces este ensayo requerirá 24 horas o más para completar.

Estos ciclos de carga y descarga pueden ser particularmente útiles en asentamientos en el rango del movimiento plástico observando el desarrollo del movimiento residual (plástico) con incrementos de carga.

Cuando inicia el ensayo de Compresión Controlada, se aplica la carga de ensayo en incrementos y permite a la cimentación bajar en cada incremento. Luego se anota el correspondiente desplazamiento y se genera una curva carga–desplazamiento. Incrementos de 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 y 200 por ciento de la carga admisible o requerida son típicamente utilizados en el ensayo.

---

El procedimiento establece que no deben haber asentamientos mayores a 0.25mm (0.01 pulgadas) en cada intervalo de carga o por cada hora.

### **3.1.3 Ensayo de Ratio de Penetración Constante (Constan Rate of Penetration (CRP) Test)**

Una de las ventajas de este procedimiento es su rapidez. Sin embargo, la capacidad movilizada puede ser influenciada por los efectos de las Relaciones de Deformación, particularmente en suelos cohesivos.

Una relación constante de deformación de 0.25 a 1.25 mm/minuto y 0.75 a 2.5 mm/minuto es comúnmente usada para arcillas y suelos granulares respectivamente.

Este procedimiento es menos adecuado para pilotes cimentados en roca o suelo granular y puede constituir un riesgo de seguridad si el incremento de carga llega a ser excesivo. Existe alguna normativa como la de Geotechnical Engineering Office de Hong Kong (2006) que no recomienda el uso de este procedimiento.

## **3.2 PRUEBAS DE CARGA DINÁMICA PARA PILOTES (PDA)**

Otro método para obtener la Capacidad de Carga Estática de cimentaciones profundas son los métodos de ensayos dinámicos.

Las Pruebas de Carga Dinámica (PDA) consisten en instalar instrumentos en el pilote y usarlos para monitorear la información de cargas y asentamientos obtenidos mientras la cimentación es sujeta a esfuerzos de impacto dinámico. La teoría de propagación de onda es aplicada para que las cargas dinámicas puedan ser luego usadas para desarrollar capacidades de carga estática de diseño.

Este ensayo proporciona los siguientes resultados:

- Capacidad Movilizada Total Estática de la interacción Suelo-Pilote.
- Curva Esfuerzo-Deformación Estático del Pilote.

- Capacidad por Punta y por Aporte de Fricción Lateral.
- Comportamiento del Aporte por Fricción a lo largo del Pilote.
- Eficiencia del martillo hincapilotes
- Monitorea los esfuerzos aplicados al pilote generados durante el ensayo.
- Detección de daños a lo largo del pilote.

Para realizar una correcta instrumentación del pilote es necesario que el eje de instalación de los sensores se encuentre a por lo menos a una longitud de 1.5 veces el diámetro de la sección transversal del pilote del punto de aplicación de la carga, esto con fines de estabilización de las ondas de compresión para cuando pasen por los sensores.

### **3.2.1 Sistema de aplicación de la carga**

El sistema de aplicación de la carga para pilotes hincados es el mismo equipo hincapilotes utilizado o proyectado para la instalación del tramo final de penetración en toda la obra.

### **3.2.2 Método CASE**

Conocido comúnmente como Ensayo Dinámico de Pilotes. Durante los años 1960 y 1970, investigadores en el Instituto Case de Tecnología (ahora conocido como Case Western Reserve University), desarrolló otro método dinámico de determinación de la capacidad de carga axial de pilotes: EL Método CASE. Se basa en unos análisis de fuerzas dinámicas y aceleraciones medidos en el campo mientras que el pilote está siendo hincado.

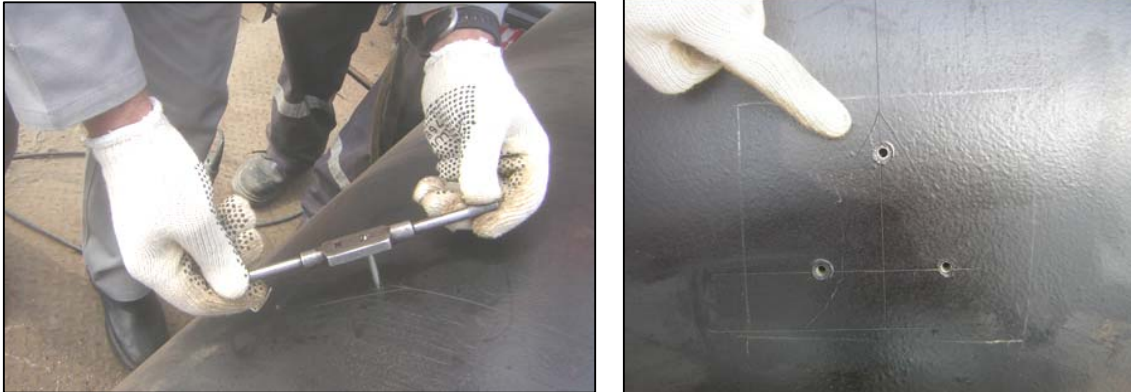
El Método Case es una técnica analítica para determinar la Capacidad Estática del Pilote desde una data de Rastreo de Onda. El cálculo de este método incluye un factor de correlación empírica,  $j_c$ , que puede ser determinado por un ensayo de carga de un pilote en el lugar. Sin embargo, es además posible usar el Método Case sin un ensayo de carga de pilote usando valores de otro suelo similar.

### **3.2.3 Analizador de Hincado de Pilotes (PDA: *Pile Driving Analyzer*)**

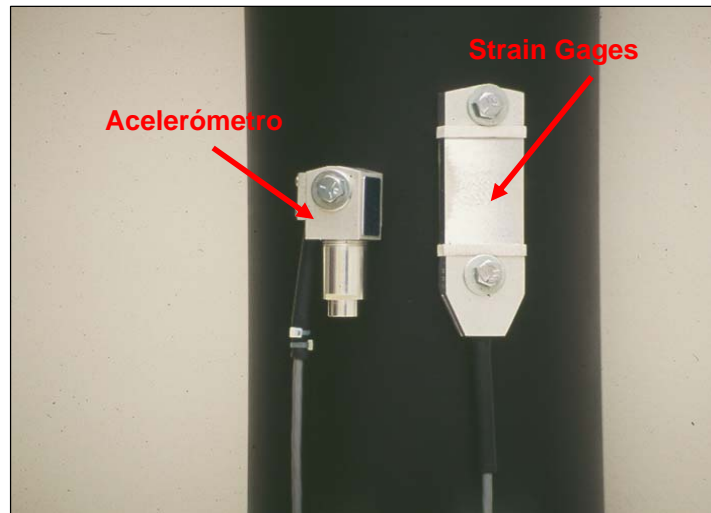
Está conformado por un equipo de campo para medir las fuerzas y aceleraciones en un pilote cuando se desarrolla el hincado. Este equipamiento incluye tres componentes:

- Un par de deformómetros montados cerca al tope del pilote. (mínimo)
- Un par de acelerómetros montado cerca al tope del pilote. (mínimo)
- Un Analizador de Hincado de Pilote (PDA)

A continuación se muestra el proceso de instrumentación del ensayo:



(a) Habilitación de perforaciones en pilote para la colocación de sensores.



(b) Instalación de los sensores PDA en Pilote de Ensayo.



(c) Instrumentación del pilote por medio de los sensores y equipo PDA

Figura 3.7: Instalación de Sensores PDA - Proyecto Marine Trestle para Southern, Perú

EL PDA monitorea la salida de los datos de los sensores cuando el pilote está siendo hincado, y evalúa esta información como sigue:

- La información de deformación, combinado con el Módulo de Elasticidad y la Sección Transversal del pilote, da la fuerza axial en el pilote.
- La información de los acelerómetros integrado en función del tiempo produce la velocidad diferencial de la onda que viaja a través del pilote.
- La información de la aceleración mediante el integrado doble en función del tiempo produce el asentamiento del pilote por golpe.

Usando esta información, el PDA calcula la capacidad de soporte por el Método CASE y expone los resultados inmediatamente en el lugar del proyecto. Además puede guardar la información de campo en una memoria portátil para proporcionar ingreso de información para el análisis CAPWAP. Este análisis será descrito posteriormente.

### 3.2.4 Propagación de Onda en el Método CASE

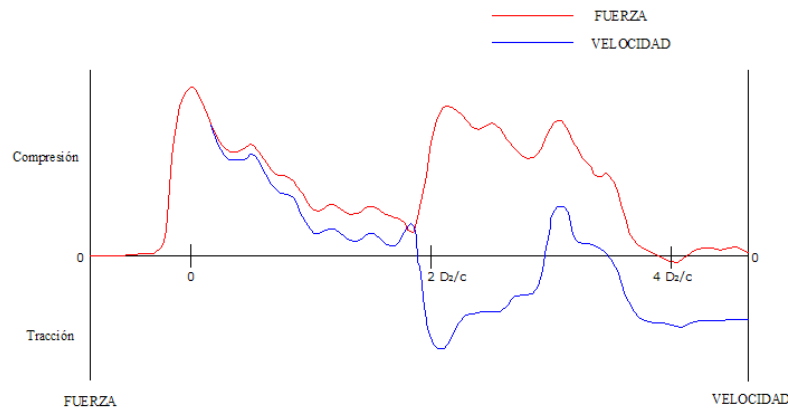
El impacto del martillo crea una onda en compresión que viaja hacia abajo del pilote. Cuando viaja, el pulso induce una velocidad pequeña descendente (positiva). Si el pilote tiene solo una resistencia por punta (sin fricción lateral), el pulso no se refleja en la parte inferior y viaja de regreso hacia arriba como otra onda de compresión. Esta onda reflejada produce un movimiento ascendente (negativo).

El tiempo requerido para que la onda viaje a la parte inferior del pilote y retorne es  $2 D_2/c$ , donde:

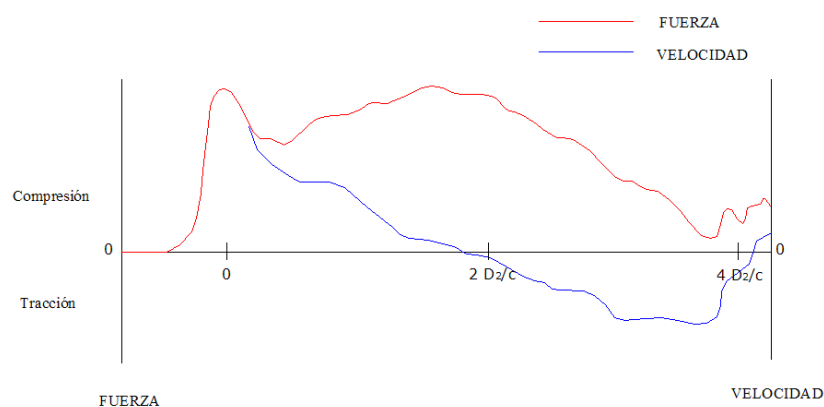
Donde:

$D_2$  = Distancia desde los sensores y acelerómetros a la cumbre del pilote.

$c$  = Velocidad de la onda en el pilote



(a) Caso de Mayor Capacidad por Aporte por Punta



(b) Caso de Mayor Capacidad por Aporte por Fricción.

Figura 3.8: Curvas Fuerza y Velocidad vs. Tiempo en un Pilote.

El tiempo  $2 D_2/c$  es muy corto comparado al intervalo entre golpes de martillo. Por lo tanto, el PDA puede observar los efectos de un simple golpe.

La gráfica de fuerza vs velocidad de un pilote de carga por aporte mayormente por punta (como es medido y representado por el PDA) son similares a los de la Figura 3.8a, estos gráficos son llamados Rastreo de Ondas. En el caso de otro pilote que no tiene resistencia por fricción lateral y mucho menos capacidad de carga por punta que el mostrado. Su comportamiento muestra más de la energía en el movimiento descendente de la onda, donde este es gastado en avance del pilote, por lo que la onda reflejada tiene menos fuerza y menor velocidad.

Finalmente, considerando un pilote por fricción con muy pequeña resistencia por punta, como el pulso de la onda a compresión viaja hasta abajo del pilote, encuentra resistencia por la fricción lateral, entonces la del rastreo de onda medida cerca del tope sería similar a la Figura 3.8b. La escala de tiempo correspondiente a la profundidad debajo del instrumento, y la distancia vertical entre las líneas de fuerza y velocidad refleja la resistencia del suelo en varias profundidades.



---

El Rastreo de Onda además provee información acerca de la integridad del pilote. Por ejemplo, si el pilote se rompe durante el hincado, la fractura produce una onda reflejada que cambia el rastreo de onda grabada por el PDA.

### **3.2.5 Análisis CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*)**

El Método CASE, mientras sea útil, es una simplificación de la real dinámica del hincado de pilotes. El factor  $J_c$  empíricamente obtenido, calibra el análisis, por lo que el resultado final no es mejor que el valor determinado por la habilidad del ingeniero a cargo, considerado por Rausche, Moses y Goble (1972, obtenido de Coduto D., 2001). En contraste, un análisis por medio de la ecuación de la onda utiliza un modelo numérico mucho más preciso, pero sufre de estimaciones débiles de la energía actual entregada por el martillo. Afortunadamente, las fortalezas y las debilidades de estos dos métodos son complementarias, entonces podemos combinarlos para formar un análisis mejorado. Este análisis combinado es conocido como CAPWAP ó Programa de Análisis Case de Ondas en Pilotes.

El modelo numérico usado en CAPWAP es esencialmente el mismo que el de la ecuación de la onda excepto que el martillo y accesorios son removidos y reemplazado con data de Fuerza vs Tiempo y Velocidad vs Tiempo obtenido por el analizador de hincado de pilotes. Por comportamiento de cada iteración, el análisis produce valores de  $R_u$  (resistencia última en el suelo),  $q$  (el desplazamiento dinámico, quake), y  $J_c$  (factor de amortiguamiento del suelo para el método CASE).

## CAPÍTULO IV

### CASOS ESTUDIADOS

Para lograr los objetivos de la presente investigación se ha ejecutado una serie de ensayos de Prueba de Carga Estática (ASTM D1143) y Pruebas de Carga Dinámica (ASTM D4945), cuyos casos de estudio son los siguientes:

- CASO I: Pilotes Tubulares de Acero con Punta Cerrada en Iquitos – Loreto – Perú.
- CASO II: Pilotes Cuadrados de Concreto Armado en Rioja – San Martín – Perú.
- CASO III: Pilotes Cuadrados de Concreto Armado en Chimbote – Ancash – Perú.



Figura 4.1: Plano de Ubicación de los casos estudiados en el territorio peruano.

Estos tres casos presentados son ubicados en distintos lugares del Perú como se muestra en la Figura 4.1, por consiguiente tienen distintas configuraciones geológicas o geotécnicas.

Para la determinación de la Capacidad Última o de Falla Suelo – Pilote se ha considerado el Método de Davisson, éste consiste en la ubicación del punto gráfico de intersección de la Curva Carga vs. Deformación del cabezal del pilote con la recta identificada por la Deformación Elástica + (3.8mm + Diámetro/120). La deformación elástica del pilote es obtenida mediante la Ecuación 3.1.

#### **4.1 CASO I: Pilotes Tubulares de Acero con Punta Cerrada en Iquitos – Loreto – Perú**

##### **4.1.1 Ubicación del Proyecto**

El área del proyecto se encuentra ubicada en las instalaciones de Electro Oriente en Calle Freyre Nro. 1158, en el distrito de Punchana, Provincia de Maynas, Región Loreto.

##### **4.1.2 Características Geotécnicas**

Las características geotécnicas del proyecto se han obtenido del Estudio de Mecánica de Suelos con Fines de Cimentación elaborado por Jorge E. Alva Hurtado Ingenieros EIRL en diciembre del 2012.

Los trabajos de campo consistieron en la realización de ensayos de Penetración Estándar (SPT) hasta una profundidad de 7.00m, así como también 05 líneas geofísicas de refracción y 03 líneas de análisis de ondas MASW.

El nivel freático fue encontrado a 2.00m de profundidad del nivel de terreno.

Los resultados del muestreo y de los ensayos de laboratorio son mostrados a continuación:

Tabla 4.1: Resultados de SPT del Sondaje P-01 – Iquitos

<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>N</b>
1.00 - 1.45	12
2.00 - 2.45	11
3.00 - 3.45	14
4.00 - 4.45	80
5.00 - 5.45	64
6.00 - 6.45	68
7.00 - 7.45	60

De acuerdo a la estratigrafía de la zona del proyecto se ha identificado un suelo arcilloso de media a alta plasticidad (CL-CH) que varía entre 1 a 6 metros con una consistencia de blanda a media. Luego aparece una arena fina pobremente gradada (SP), con un espesor de estrato entre los 4.0 a 8.0 metros, con una compacidad relativa de media a densa. Posteriormente aparece una arcilla de media a alta plasticidad (CL-CH) de una consistencia dura a rígida.

Tabla 4.2: Resumen de Resultados de Ensayos de Laboratorio – Iquitos

PROFUNDIDAD (m)	ENSAYOS ESTÁNDAR			
	Clasificación SUCS	W (%)	LL (%)	IP (%)
1.00 - 1.45	CL	25.49	41.43	22.41
1.45 - 2.00	CL	26.6	42.84	23.98
2.00 - 2.45	CL	24.4	41.07	21.2
3.00 - 3.45	CL	25.61	43.26	25.67
4.00 - 4.15	CL	24.88	31.28	14.03
4.15 - 4.40	CL	25.83	35.89	17.86
5.00 - 5.45	SM	9.4	*	*
6.00 - 6.45	SM	15.45		
7.00 - 7.45	SP-SM	15.41		
7.45 - 8.00	SP-SM	17.73		

(\*) No Plástico

Tabla 4.3: Resumen de Ensayo de Refracción Sísmica – Iquitos

Profundidad (m)	Interpretación	Vp (m/s)
3.50 - 7.00	Suelo Blando	150 - 233
12.00 - 14.00	Material Granular saturado de compacidad de medianamente densa a densa	250 - 400
21.00 - 22.00		
	Material Granular saturado de compacidad densa a muy densa	> 350

Tabla 4.4: Resumen de Ensayo de Línea Geofísica (Ondas S) – Iquitos

Profundidad (m)	Interpretación	Vs (m/s)
0.00 - 7.00	Suelo Blando	150 - 227
7.00 - 11.00	Material Granular saturado de compacidad de medianamente densa a densa	245 - 313
11.00 - 30.00	Material Granular saturado de compacidad densa a muy densa	348 - 393

La caracterización dinámica del suelo de la zona indica que se encuentra clasificado según la International Building Code (2009) como tipo “D”, el cual corresponde a un suelo rígido.

La agresión química del suelo está por debajo de los límites permisibles como se puede ver en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Resumen de Análisis Químico del Suelo – Iquitos

Profundidad (m)	Análisis Químicos		
	Cl (ppm)	SO4 (ppm)	S.S.T. (ppm)
6.45 - 7.00	24.47	3.60	111.90

El estudio geotécnico plantea la utilización de pilotes hincados realizando un cálculo de capacidad de carga con los métodos semi-empíricos de Aoki-Velloso, P.P. Velloso, Meyerhof y Decourt-Quaresma, y método analítico basado en los ensayos de laboratorio. En este cálculo analítico se ha utilizado un factor de seguridad igual a 2.5. Los resultados son mostrados en la Tabla 4.6, del cual el informe concluye en una Capacidad Admisibile para un pilote tubular de 30cm de diámetro con 7.00m de longitud con respecto al nivel de terreno natural (considerado 2.0m no aporte del terreno por corte en el suelo por cimentación superficial y/o nivelación de terreno) igual a **71.00 ton**. El asentamiento obtenido mediante métodos semiempírico y empírico son 2.74mm y 0.34mm respectivamente.

Tabla 4.6: Capacidad Admisible para Pilotes de Acero Tubular – Iquitos

Método	Profundidad (m)	Cap. Carga Adm. (ton)
		Pilote de Acero Tubular D=30cm
Aoki - Velloso	7.00	85.50
Decourt - Quaresma		73.80
P.P. Velloso		103.00
Meyerhof		55.98
Analítico		47.30

### 4.1.3 Características de Pilotes Ensayados

Los pilotes ensayados son tubería de acero de diámetro nominal 12”, schedule 40, que establece como diámetro externo de 323.85 mm y espesor igual a 10.31 mm.

Los pilotes fueron fabricados de acero con un esfuerzo de fluencia  $f_y = \text{mín. } 360\text{MPa}$  o equivalente.

Para el material del pilote se adoptó un peso específico de  $7,88 \text{ ton/m}^3$  y módulo de elasticidad de  $2109 \text{ ton/cm}^2$ , correspondiente a una velocidad de propagación de la onda de  $5123 \text{ m/s}$ . El tubo tiene en toda su longitud una sección transversal maciza de  $101.56 \text{ cm}^2$ , sección en la punta de  $823.716 \text{ cm}^2$  y perímetro  $1.0174\text{m}$ .

Las especificaciones técnicas del proyecto requieren una longitud de empotramiento aproximado de  $5.0\text{m}$  y una capacidad geotécnica en estado límite del pilote determinado por la Eurocode EN 1997-1:2004 a Compresión igual a **400 KN (40.77 ton)** y a Tracción igual a **40KN (4.08 ton)**.

Los impactos para la instalación fueron realizados mediante martillo Diesel Simple Acción DELMAG Tipo D-12, con una masa de 1.0 tonelada y capaz de suministrar una energía máxima de  $3.125 \text{ ton-m}$ , la velocidad de trabajo es entre 40 a 56 golpes por minuto según información del fabricante. En este caso no se utilizó sistema amortiguador (metal-metal).

#### 4.1.4 Resultados de Pruebas de Carga Estática

Los pilotes ensayados mediante prueba de carga estática (ASTM D1143), fueron evaluados hasta 80.00 ton. Las fechas de ejecución de los ensayos fueron entre el 5 al 8 de julio del 2013.

Tabla 4.7: Características de los Pilotes Ensayados PCE Compresión – Iquitos

<b>Identificación del Pilote</b>	<b>Longitud Empotrada (m)</b>	<b>Tres Últimos Ratios de Penetración (Nro. Golpes/ 0.10m)</b>
PP1-ENGINE HALL - MOTORES	5.10	96-100-123
PP2-STACK	4.90	80-99-130

El sistema de aplicación de carga fue mediante un cilindro hidráulico de 200 toneladas de capacidad, marca SPX-POWER TEAM, provista de un manómetro de 200 toneladas de capacidad, cuyo equivalente es de 10000 lbs/pulg<sup>2</sup> (área del pistón 21.8 pulg<sup>2</sup>).

El sistema de reacción utilizado está conformado por una viga principal compuesta por dos (2) perfiles W18x76 de 2.70m aprox. apoyada lateralmente en cada lado en un (1) perfil W18x76. Estos perfiles están apoyados en seis (6) pilotes como mínimo. El Peso Muerto colocado es aproximadamente 88.0 ton conformado por 60 und de planchas de acero A-31 de 6mx2mx3/8", 358 ángulos de acero L4x4x3/8" x 6m, adicionalmente a los perfiles que conforman a las vigas principales y secundarias.

El sistema de medición está conformado por tres relojes de medición o extensómetros marca Mitutoyo de series HZY 390, HZY 448 y HZY 394.

Las lecturas obtenidas en la PCE a compresión pueden ser vistas en el anexo A de la presente tesis.

De acuerdo a las lecturas obtenidas (ver anexo A) se establece las curvas Carga y Descarga vs. Deformación Total a nivel de cabezal del pilote como resultante directo de la prueba de carga estática, en dicha figura adicionalmente se ha considerado la recta del método de Davisson para la estimación de capacidad de carga última con las proyecciones de las curvas obtenidas durante el ensayo:

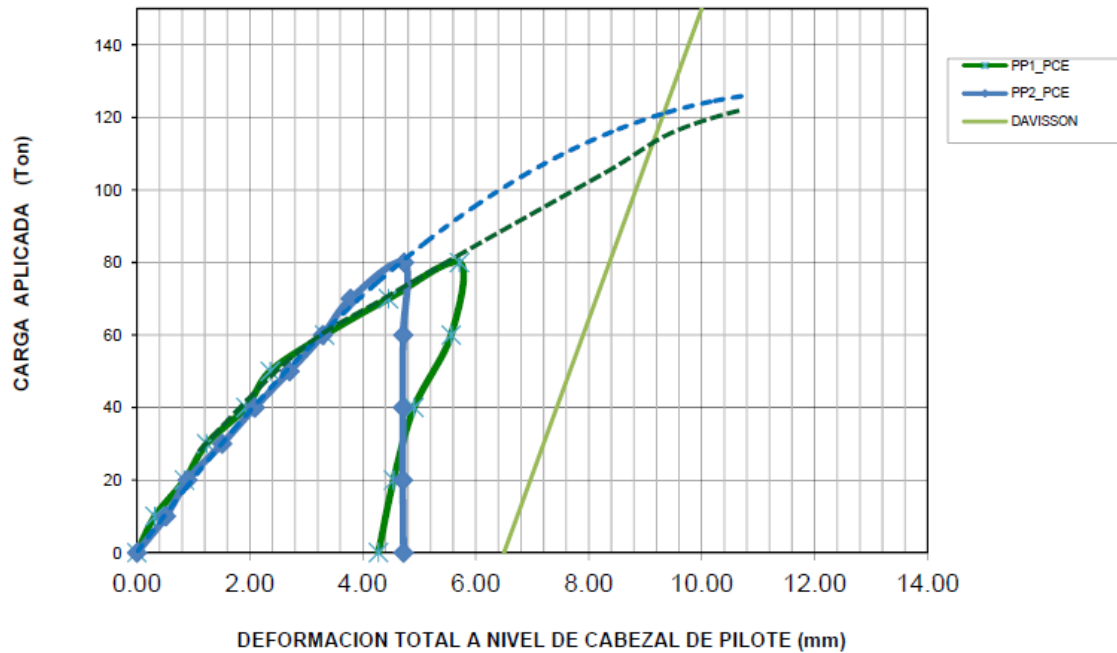


Figura 4.2: Curvas Carga Aplicada vs Deformación Total PCE Compresión – Iquitos

De acuerdo al Método de Davisson se obtiene como Capacidad de Carga Última de la interacción Suelo-Pilote para el pilote PP1 y PP2 los valores de 116 ton y 121 ton con una deformación máxima en el cabezal del pilote de 9.207 mm y 9.417mm respectivamente.

A continuación se muestra el proceso de instrumentación de estos pilotes, en la Figura 4.3 se puede apreciar el sistema de reacción instalado (parte izquierda) y el proceso de aplicación de carga (parte derecha):





Figura 4.3: Registro Fotográfico del Proceso de PCE Compresión – Iquitos

#### 4.1.5 Resultados de Pruebas de Carga Dinámica

Los pilotes ensayados mediante prueba de carga dinámica (ASTM D 4945) fueron realizados los días 10, 14 y 20 de junio del 2013.

El ensayo dinámico fue ejecutado con un equipo Analizador de Hincada de Pilotes (PDA en su sigla en inglés) fabricado por Pile Dynamics, Inc. de Cleveland, Ohio, Estados Unidos. Los sensores del mismo fabricante encargados de la medición son:

- Deformómetros: E398, I516 y I543
- Acelerómetros (Piezoeléctricos): 32203 y 32204

Las características de los pilotes ensayados son los siguientes:

Tabla 4.8: Características de los Pilotes Ensayados PDA – Iquitos

Identificación del Pilote	Longitud Total (m)	Longitud bajo los sensores (m)	Tres Últimos Ratios de Penetración (Nro. Golpes/ 0.10m)	Penetración en el Suelo (m)	
				Inicial	Final
008-ENG HALL-MOTOR	7.00	6.20	60-84-111	4.80	4.90
014-ENG HALL-MOTOR	7.00	6.00	60-92-98	4.60	4.70

028-ENGINE HALL	7.00	6.00	67-55-99	4.60	4.90
022-STACK	7.00	6.00	87-100-100	3.50	4.80
024-STACK	7.00	5.70	47-50-48	3.50	4.65
083-ENGINE HALL	7.00	6.00	83-124-80	4.80	4.85
077-ENGINE HALL	7.00	5.80	83-112-79	4.50	4.55
065-ENGINE HALL - MOTORES	7.00	6.20	76-109-94	4.90	4.95
066-ENGINE HALL - MOTORES	7.00	6.30	47-70-50	5.20	5.30
PP1-ENGINE HALL - MOTORES	7.00	6.40	96-100-123	4.60	5.10
05-TANQUES	8.00	7.40	39-43-54	7.00	7.05

El sistema de impacto utilizado durante el ensayo es el mismo martillo hincapilotes empleado en la instalación de los pilotes definitivos mencionado en la sección anterior.

Al realizar el análisis CAPWAP para cada uno de los pilotes se tiene los siguientes resultados resumen:

Tabla 4.9: Resultados de Análisis CAPWAP – Iquitos

Identificación del Pilote	Golpe Nro.	Evento	Fricción de Manto (ton)	Resistencia de Punta (ton)	Capacidad total (ton)
008-ENG HALL-MOTOR	107/113	Ensayo PDA en rehınca a los 13 días	48.8	59.2	108.0
014-ENG HALL-MOTOR	58/105	Ensayo PDA en rehınca a los 10 días	26.0	80.3	106.3
028-ENGINE HALL	148/207	Ensayo PDA en rehınca a los 10 días	25.0	76.3	101.3
022-STACK	482/548	Ensayo PDA durante el hincado	37.4	82.6	120.0
024-STACK	247/268	Ensayo PDA durante el hincado	20.4	93.4	113.8

083-ENGINE HALL	71/77	Ensayo PDA en rehınca a los 3 días	39.1	81.9	121.0
077-ENGINE HALL	77/80	Ensayo PDA en rehınca a los 3 días	37.6	69.3	106.9
065-ENGINE HALL – MOTORES	38/47	Ensayo PDA en rehınca a los 13 días	53.9	58.3	112.1
066-ENGINE HALL – MOTORES	22/52	Ensayo PDA en rehınca a los 13 días	23.9	72.0	95.8
PP1-ENGINE HALL – MOTORES	486/496	Ensayo PDA durante la instalación	34.5	71.5	106.0
05-TANQUES	15/57	Ensayo PDA en rehınca a los 2 días	67.5	62.5	130.0

En la Tabla 4.10 se muestra la capacidad máxima movilizada en el ensayo correlacionado con la penetración total del pilote en el suelo, deformación máxima axial (DMX) y la energía transferida (EMX) en el golpe analizado por CAPWAP:

Tabla 4.10: Capacidad de Carga Máxima – Iquitos

Identificación del Pilote	Penetración en el suelo final (m)	Desplazamiento Total DMX (mm)	Asentamiento Permanente Observado (mm)	Energía Transf. EMX (ton.m)	Capacidad Movilizada (ton)	
					Compresión	Tracción
008-ENG HALL-MOTOR	4.90	9.06	0.88	0.61	<b>105.0</b>	<b>34.2</b>
014-ENG HALL-MOTOR	4.70	9.41	0.95	0.54	<b>97.0</b>	<b>18.2</b>
028-ENGINE HALL	4.90	9.13	1.05	0.65	<b>93.00</b>	<b>17.5</b>
022-STACK	4.80	10.30	1.00	0.78	<b>108.0</b>	<b>26.2</b>
024-STACK	4.65	11.37	2.27	0.76	<b>97.0</b>	<b>22.5</b>
083-ENGINE HALL	4.85	10.12	0.64	0.84	<b>119.0</b>	<b>27.4</b>

077-ENGINE HALL	4.55	9.46	0.63	0.73	<b>106.0</b>	<b>26.3</b>
065-ENGINE HALL - MOTORES	4.95	8.40	1.06	0.75	<b>109.0</b>	<b>37.7</b>
066-ENGINE HALL - MOTORES	5.30	9.79	1.79	0.77	<b>91.0</b>	<b>16.7</b>
PP1-ENGINE HALL - MOTORES	5.10	9.29	0.81	0.94	<b>100.0</b>	<b>24.1</b>
05-TANQUES	7.05	6.10	1.83	0.54	<b>130.0</b>	<b>47.3</b>

En la Tabla 4.10 se está colocando la capacidad de carga a compresión obtenida utilizando el Método de Davisson.

La capacidad de carga a tracción fue estimada a partir de la fricción de manto determinada por el análisis CAPWAP. Para la determinación de la capacidad a tracción, la fricción estará afectada por un factor de reducción igual a 0,70.

A continuación se presentan los valores máximos de las tensiones medidas en la región de los sensores durante el ensayo dinámico:

Tabla 4.11: Esfuerzos durante el ensayo dinámico – Iquitos

Identificación del Pilote	Esfuerzo de Compresión - media de los 4 sensores (CSX) MPa	Esfuerzo de Compresión - máxima de los 4 sensores (CSI) MPa	Esfuerzo de Tracción (TSX) MPa
008-ENG HALL-MOTOR	123.4	143.2	4.8
014-ENG HALL-MOTOR	105.6	127.4	9.5
028-ENGINE HALL	118.6	153.4	4.1
022-STACK	126.5	176.1	26.5

024-STACK	162.0	127.9	26.0
083-ENGINE HALL	132.2	154.2	5.9
077-ENGINE HALL	155.8	183.6	29.8
065-ENGINE HALL - MOTORES	140.7	181.3	16.9
066-ENGINE HALL - MOTORES	117.3	195.2	24.5
PP1-ENGINE HALL - MOTORES	187.8	205.3	14.9
05-TANQUES	151.9	162.0	13.1

En la Figura 4.4 se muestra la modelación del comportamiento estático calculado en base a los resultados del ensayo dinámico mediante curvas Carga y Descarga vs. Deformación Total a nivel de cabezal del pilote (zona de colocación de sensores) incluyendo la recta del Método de Davisson:

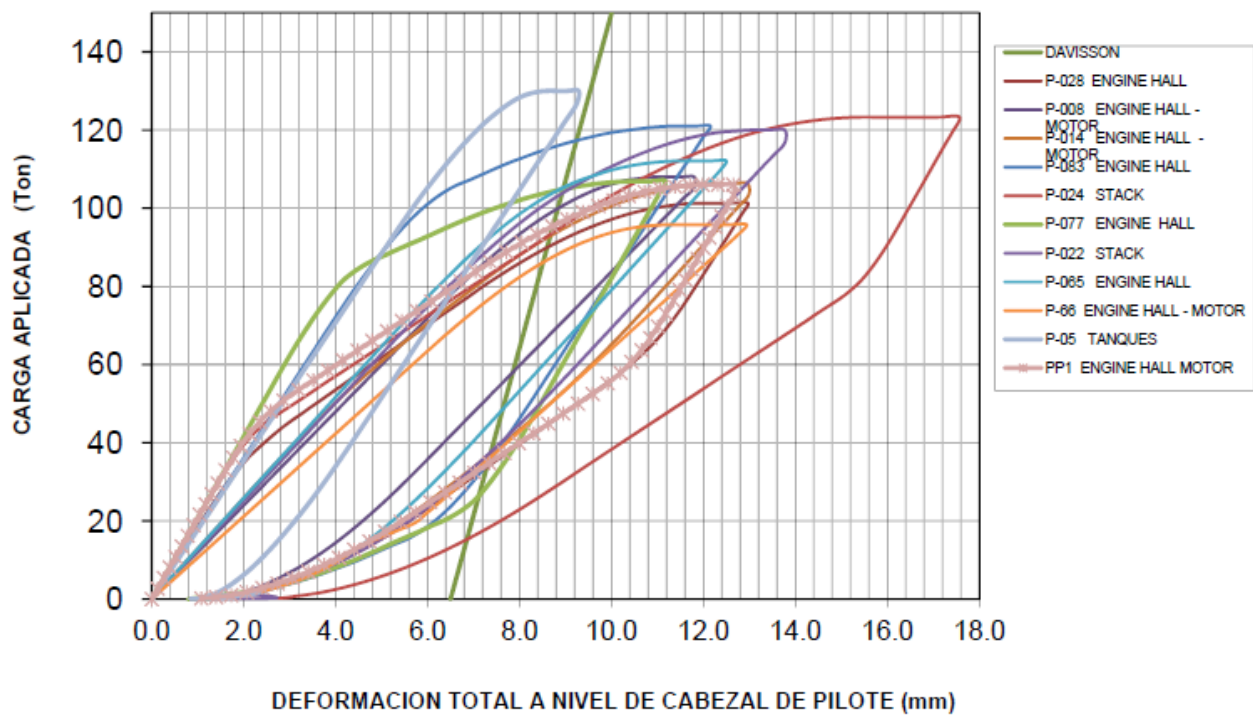
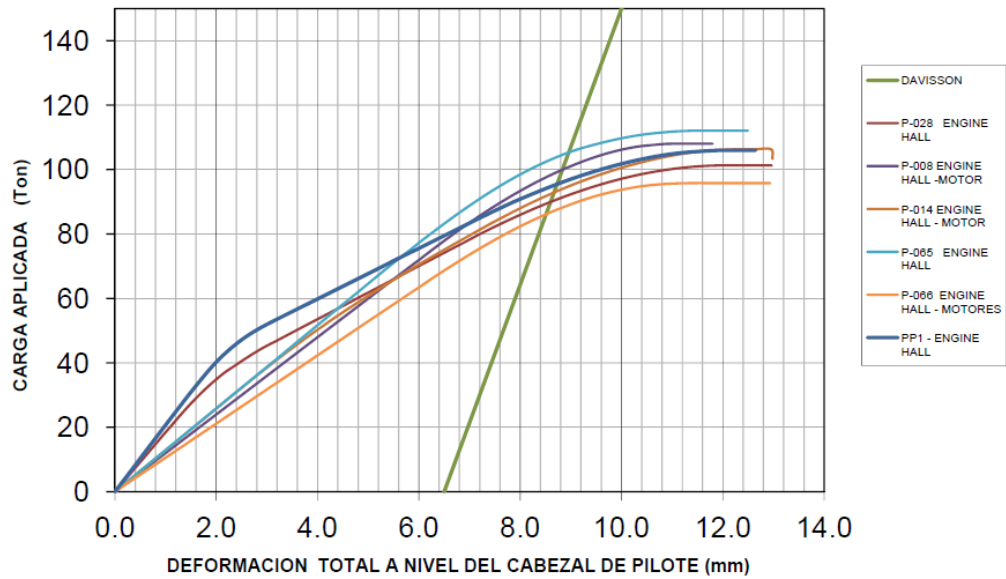
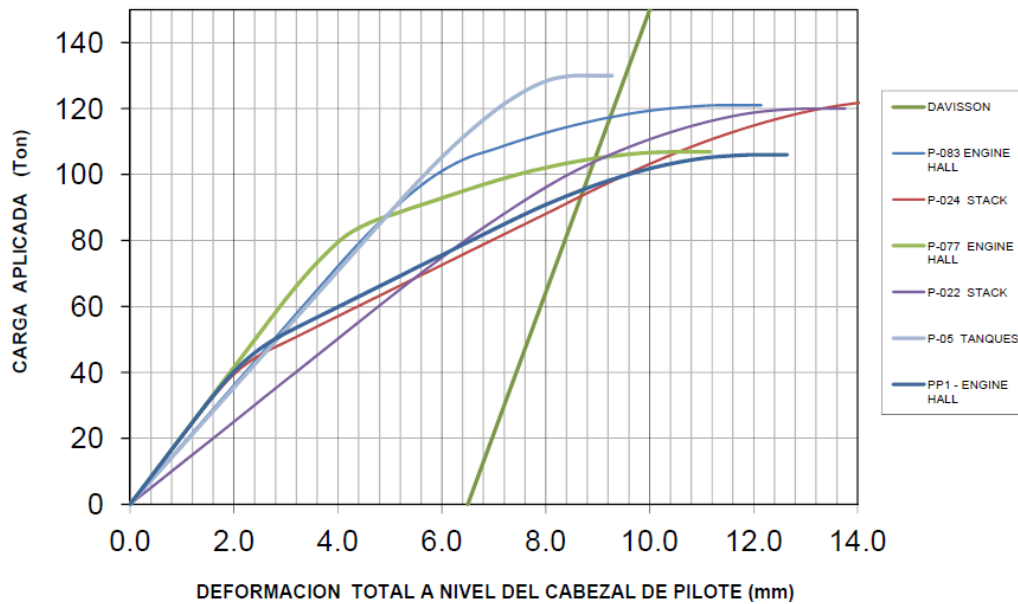


Figura 4.4: Curvas Carga vs Deformación Total calculada por el PDA – Iquitos

Se ha agrupado los pilotes por el tiempo de relajación del suelo por el proceso de hincado. A continuación se muestra las curvas Carga vs. Deformación de ensayos ejecutados a pilotes antes y después de 7 días de hincado:



(a) Ensayado posterior a los 7 días de instalado



(b) Ensayado durante o antes de 7 días de instalado

Figura 4.5: Curvas Carga Aplicada vs Deformación en función del tiempo de relación del Suelo – Iquitos

A continuación se muestra el proceso de instrumentación de estos pilotes, en la figura 4.6 se puede apreciar los sensores instalados en el pilote (parte izquierda) y el proceso de aplicación de carga mediante martillo hincapilotes (parte derecha):



Figura 4.6: Registro Fotográfico del Proceso de Prueba de Carga Dinámica – Iquitos

## 4.2 CASO II: Pilotes Cuadrados de Concreto Armado en Rioja – San Martín – Perú.

### 4.2.1 Ubicación del Proyecto

El área del proyecto se encuentra ubicada en las instalaciones de Cemento Selva en la vía rumbo a Nueva Cajamarca cerca a Segunda Jerusalén (Azungullo) en el distrito de Rioja, Provincia del mismo nombre, Región San Martín.

### 4.2.2 Características Geotécnicas

Las características geotécnicas del proyecto se han obtenido de la ponencia del Dr. Ing. Jorge Alva Hurtado, **Pilotaje en Proyectos de Ingeniería**, del V Congreso Internacional de la Construcción, Universidad Nacional de Ingeniería FIC, del 2 al 4 de diciembre del 2010.

La geología de la zona establece un terreno de la era cenozoica cuaternario del tipo de depósitos aluvionales y glaciofluviales.

Este informe fue realizado el 31 de octubre del 2007, donde se realizaron dos sondajes exploratorios con ensayos de penetración estándar (SPT) y Cono Peck (CP), los valores utilizados para el cálculo de la capacidad de carga de los pilotes fueron del sondaje S-1.

Tabla 4.12: Resultados de ensayo de penetración estándar (SPT) y clasificación de suelos (SUCS) – Rioja

PROFUNDIDAD (m)	N <sub>SPT</sub>		Clasificación SUCS
	S-1	S-2	
1.00 - 1.60	4	24	GM / SP-SM
2.00 - 2.65	9	18	CL
3.00 - 3.45	1	5	SC / OH
4.00 - 4.45	7		OL
5.00 - 5.45	6	5	MH
6.00 - 6.45	6	19	SC / CL-ML
7.00 - 7.45	24	24	SM
8.00 - 8.45	5	34	OH / CL
9.00 - 9.45	7	13	CL / SC
10.00 - 10.45	7	5	CL
11.00 - 11.45	7	6	CL
12.00 - 12.45	7	6	OH
13.00 - 13.45	12	9	OL
14.00 - 14.45	10	9	OH
15.00 - 15.45	12	11	OH
16.30 - 16.80	8	11	MH / OH
17.00 - 17.45	11	10	OH
18.00 - 18.45	11	15	OL
19.00 - 19.45	9	10	OL
20.00 - 20.45	10	10	OH
21.00 - 21.45	29	9	OH/ CL-ML/SM
22.00 - 22.45	27	8	SM
23.00 - 23.45	50	54	ML
24.00 - 24.45	56	58	ML
25.00 - 25.45	59	68	SP-SM
26.00 - 26.45		64	

El nivel freático fue encontrado a 2.45m de profundidad del nivel de terreno.



Tabla 4.13: Resultados de ensayo Cono Peck (CP) – Rioja

PROFUNDIDAD (m)	CP		PROFUNDIDAD (m)	CP	
	S-1	S-2		S-1	S-2
26.20	15		30.30	10	32
26.40	26		30.20	11	26
26.50	73		30.50	14	24
26.60	58		30.70	20	23
26.80	31		30.90	112	27
26.90	10		31.00	54	63
27.00	6	11	31.10	15	52
27.20	32		31.30	14	35
27.40	118	11	31.50	20	30
27.60	86	21	31.60	25	20
27.70	27	14	31.70	33	21
27.90	13	11	31.90	25	29
28.00	34	61	32.10	50	67
28.20	35	32	32.20	64	56
28.30	57	10	32.30	65	66
28.60	58	43	32.50	66	
28.70	60	30	32.70	96	
28.90	48	12	32.80	82	
29.00	73	59	32.90	95	
29.10	69	56	33.10	85	
29.30	58	66	33.20	154	
29.50	24	55			
29.70	44	68			
29.80	14	45			
29.90	12	19			
30.10	10	23			

De los resultados del Cono Peck, visto en la Tabla 4.13, se realizó un equivalente del valor de N del Ensayo de Penetración Estándar (SPT), estos valores son presentados a continuación:

Tabla 4.14: Valores Equivalentes N a partir del ensayo de Cono Peck para los 26 a 33m de profundidad– Rioja

<b>Profundidad (m)</b>	<b>N<sub>equivalente</sub></b>
26.00	34
27.00	43
28.00	50
29.00	40
30.00	22
31.00	22
32.00	50
33.00	50

El estudio geotécnico plantea la utilización de pilotes hincados cuadros de concreto armado realizando un cálculo de capacidad de carga con los métodos semi-empíricos de Aoki-Velloso, P.P. Velloso, Meyerhof y Decourt-Quaresma. En este cálculo analítico se ha utilizado un factor de seguridad igual a 2.5. Los resultados son mostrados en la Tabla 4.15, del cual el informe concluye en una Capacidad Admisible para un pilote cuadrado de lado 45cm con una longitud de 24.0m con respecto al nivel de terreno natural, considerando el aporte de terreno desde el nivel de exploración, da un rango de resultados entre **39.00 a 95.00 ton** en función al método empleado. El asentamiento total obtenido mediante métodos semiempíricos son 4.89mm (Vesic) y 8.99mm (por deformación axial y transferencia de carga en punta y fuste).

Tabla 4.15: Capacidad Admisible para Pilotes Cuadrado C°A°– Rioja

<b>Método</b>	<b>Aoki-Velloso</b>	<b>Decort-Quaresma</b>	<b>P.P. Velloso</b>	<b>Meyerhof (Sin Corrección)</b>	<b>Meyerhof (Con Corrección)</b>
Sondaje 1	233	232	231	119	103
Sondaje 2	207	243	246	103	92
Promedio	220	238	239	111	98
<b>Carga Diseño (ton) FS= 2.5</b>	<b>88</b>	<b>95</b>	<b>95</b>	<b>45</b>	<b>39</b>

### 4.2.3 Características de los Pilotes Ensayados

Los pilotes ensayados son de concreto armado de sección cuadrada de 400 mm de lado. El concreto armado especificado para los pilotes tiene un  $f'c$  igual a 35 MPa.

---

Para el material del pilote fue adoptado peso específico de 2,45 ton/m<sup>3</sup> y módulo de elasticidad de 361 ton/cm<sup>2</sup>, correspondiente a una velocidad de propagación de la onda de 3800 m/s. El pilote tiene en toda su longitud una sección transversal maciza de 1600 cm<sup>2</sup> y perímetro 1.60m.

Las especificaciones técnicas del proyecto requieren una longitud de empotramiento aproximado de 25.0m y una Carga de Trabajo a Compresión entre **110 y 120 ton** en función a la zona.

Los impactos para la instalación fueron realizados mediante martillo Diesel Simple Acción, en este proyecto se utilizaron para el último tramo de penetración uno de los siguientes equipos:

- a) DELMAG Tipo D-30, con una masa de 3.0 toneladas y capaz de suministrar una energía máxima de 8.256 ton-m. La velocidad de trabajo es entre 40 a 56 golpes por minuto según información del fabricante.
- b) KOBE Tipo K-25, con una masa de 2.5 toneladas y capaz de suministrar una energía máxima de 7.121 ton-m. La velocidad de trabajo es entre 40 a 56 golpes por minuto según información del fabricante.

#### **4.2.4 Resultados de Pruebas de Carga Estática**

A los pilotes ensayados mediante prueba de carga estática (ASTM D1143), se les aplicó una carga entre 220.00 ton y 240 ton respectivamente. Las fechas de ejecución de los ensayos fueron el 14, 15, 20 y 21 de setiembre, 25 y 26 de octubre del 2011 ubicados en Silo P85, Secador Nro. 02 y Horno Nro. 4. A continuación se muestra las características adicionales de los pilotes:

Tabla 4.16: Características de los Pilotes Ensayados PCE Compresión – Rioja

Identificación del Pilote	Longitud Empotrada (m)	Martillo Hincapilotes usado en último tramo	Tres Últimas Relaciones de Penetración (Nro. Golpes/ 0.10m)
SILOS P85	24.60	KOBE K25	40-107-158
SECADOR Nro.2 Z12-P29	25.30	DELMAG D30	10-19-17
HORNO VC Nro.4 P49	25.00	DELMAG D30	8-8-75

El sistema de aplicación de carga fue mediante dos cilindros hidráulicos de 200 toneladas de capacidad, marca SPX-POWER TEAM, provista de un manómetro de 200 toneladas de capacidad, cuyo equivalente es de 10000 lbs/pulg<sup>2</sup> (área del pistón 21.8 pulg<sup>2</sup>).

El sistema de reacción utilizado está conformado por una viga principal compuesta por cuatro (4) vigas W24x84 apoyadas sobre pilotes y a su vez de vigas transversales W18x76. Estos perfiles están apoyados en cuatro (4) pilotes como mínimo.

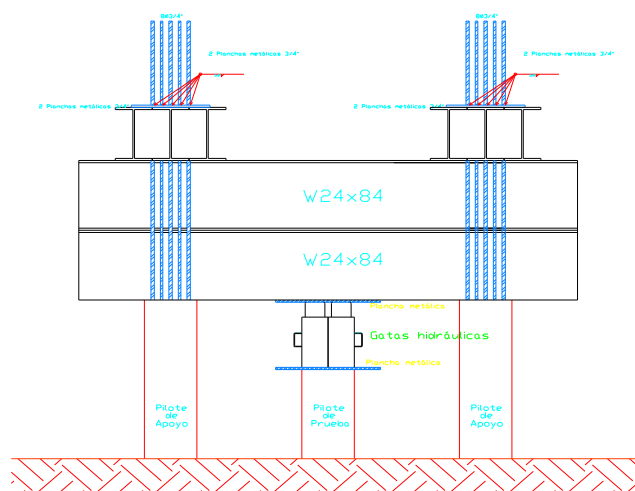


Figura 4.7: Esquema de Sistema de Ensayo PCE Compresión - Rioja

El sistema de medición está conformado por tres relojes de medición o extensómetros marca Mitutoyo de series HZY 390, HZY 448 y HZY 394.

Las lecturas obtenidas en la PCE a compresión pueden ser vistas en el Anexo B de la presente tesis.

De acuerdo a las lecturas obtenidas (ver anexo B) se establece las curvas Carga y Descarga vs Deformación Total a nivel del cabezal del pilote como resultante directo de la prueba de carga estática, en dicha figura adicionalmente se ha considerado la recta del Método de Davisson para la estimación de capacidad de carga última considerando proyecciones graficas de las curvas encontradas:

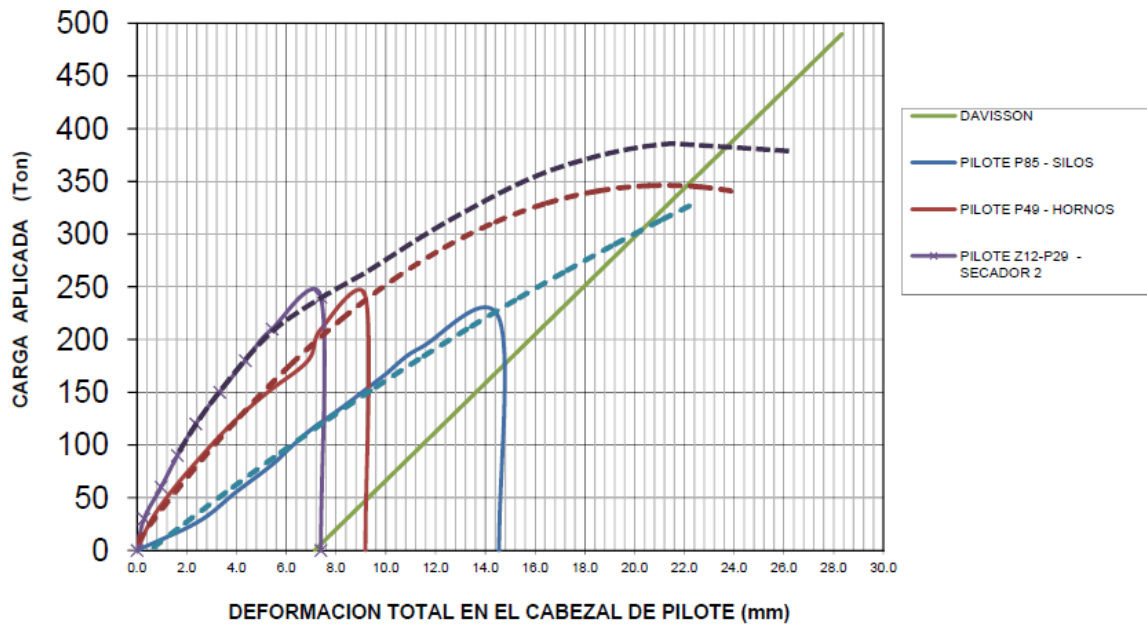


Figura 4.8: Curvas Carga Aplicada vs Deformación Total PCE Compresión – Rioja

De acuerdo al Método de Davisson se obtiene como Capacidad de Carga Última de la interacción Suelo-Pilote para los pilotes P85, P49 y Z12-P9 los valores de 300 ton, 349 ton y 380 ton con una deformación máxima en el cabezal del pilote de 20.00mm, 22.00mm y 23.80mm respectivamente.

A continuación se muestra el proceso de instrumentación de estos pilotes, en la Figura 4.9 se puede apreciar el sistema de reacción instalado (parte izquierda) y el proceso de aplicación de carga (parte derecha):



Figura 4.9: Registro Fotográfico del Proceso de PCE Compresión - Rioja

#### 4.2.5 Resultados de Pruebas de Carga Dinámica

El pilote ensayado mediante prueba de carga dinámica (ASTM D 4945) fue realizado el día 06 de setiembre del 2011 en el Horno Nro. 04. Las características de este pilote son las siguientes:

Tabla 4.17: Características de los Pilotes Ensayados PDA – Rioja

Identificación del Pilote	Longitud Total (m)	Longitud bajo los sensores (m)	Tres Últimos Ratios de Penetración (Nro. Golpes/ 0.10m)	Penetración en el Suelo (m)	
				Inicial	Final
HVC4 Z9-P50	26.10	25.30	9-10-10	24.700	24.703

El ensayo dinámico fue ejecutado con un equipo Analizador de Hincada de Pilotes (PDA en su sigla en inglés) fabricado por Pile Dynamics, Inc. de Cleveland, Ohio, Estados Unidos. Los sensores del mismo fabricante encargados de la medición son:

- Deformómetros: E369 y E398
- Acelerómetros (Piezoresistivos): K1948 y K1952

El sistema de impacto utilizado durante el ensayo es DELMAG Tipo D-22, con una masa de 2.0 tonelada y capaz de suministrar una energía máxima de 5.614 ton-m, la velocidad de trabajo es entre 40 a 56 golpes por minuto según información del fabricante. No se pudo utilizar los equipos de mayor impacto usados en el tramo final de la instalación de los pilotes debido a problemas logísticos propios del proyecto.

Al realizar el análisis CAPWAP para cada uno de los pilotes se tiene los siguientes resultados resumen:

Tabla 4.18: Resultados de Análisis CAPWAP – Rioja

Identificación del Pilote	Golpe Nro.	Evento	Fricción de Manto (ton)	Resistencia de Punta (ton)	Capacidad total (ton)
HVC4 Z9-P50	199/214	Ensayo PDA en rehınca a los 3 días	111.2	20.7	132.0

En la tabla 4.19 se muestra la capacidad máxima movilizada en el ensayo correlacionado con la penetración total del pilote en el suelo, deformación máxima axial (DMX) y la energía transferida (EMX) en el golpe analizado por CAPWAP:

Tabla 4.19: Capacidad de Carga Máxima – Rioja

Identificación del Pilote	Penetración en el suelo final (m)	Desplazamiento Total DMX (mm)	Asentamiento Permanente Observado (mm)	Energía Transf. EMX (ton.m)	Capacidad Movilizada (ton)	
					Compresión	Tracción
HVC4 Z9-P50	24.703	8.43	0.1	1.20	132.0	88.96

En la tabla 4.19 se está colocando la capacidad de carga movilizada a compresión u obtenida durante el ensayo. Utilizando el Método de Davisson con una proyección de la

curva encontrada la capacidad del pilote última sería 155 ton con un desplazamiento máximo en el cabezal de 13.80mm.

La capacidad de carga a tracción fue estimada a partir de la fricción de manto determinada por el análisis CAPWAP. Para la determinación de la capacidad a tracción, la fricción estará afectada por un factor de reducción igual a 0,70.

A continuación se presentan los valores máximos de las tensiones medidas en la región de los sensores durante el ensayo dinámico:

Tabla 4.20: Esfuerzos durante el ensayo dinámico – Rioja

Identificación del Pilote	Esfuerzo de Compresión - media de los 4 sensores (CSX) MPa	Esfuerzo de Compresión - máxima de los 4 sensores (CSI) MPa	Esfuerzo de Tracción (TSX) MPa
HVC4 Z9-P50	13.50	17.30	1.2

En la siguiente figura se muestra la modelación del comportamiento estático calculado en base a los resultados del ensayo dinámico mediante curvas Carga y Descarga vs. Deformación Total a nivel de cabezal del pilote (zona de colocación de sensores) incluyendo la recta del Método de Davisson:

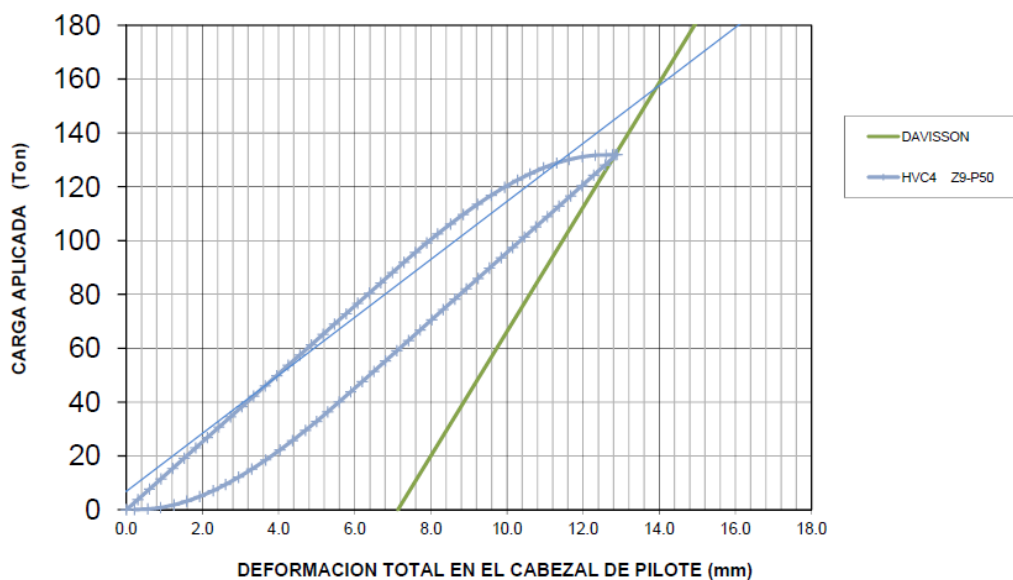


Figura 4.10: Curvas Carga Aplicada vs Deformación Total calculada por PDA – Rioja



A continuación se muestra el proceso de instrumentación de estos pilotes, en la figura 4.11 se puede apreciar los sensores instalados en el pilote (parte izquierda) y el proceso de aplicación de carga mediante martillo hincapilotes (parte derecha):



Figura 4.11: Registro Fotográfico del Proceso de Prueba de Carga Dinámica - Rioja

### **4.3 CASO III: Pilotes Cuadrados de Concreto Armado en Chimbote – Ancash – Perú.**

#### **4.3.1 Ubicación del Proyecto**

El área del proyecto se encuentra ubicada en el Bloque A1 (Ripley); Bloques D1, D2 Y D3 (tiendas varias y bancos), y Bloque A2 (Saga) del Centro Comercial Megaplaza Chimbote ubicado a la altura del Km 430 de la Carretera Panamericana Norte, en el distrito de Chimbote, Región Ancash.



Figura 4.12: Ubicación del Proyecto - Chicla

### 4.3.2 Características Geotécnicas

Las características geotécnicas del proyecto se han obtenido del Estudio Geotécnico con fines de Cimentación para el Proyecto Megacentro-Chimbote elaborado por ZER GEOSYSTEM PERU SAC en abril del 2011 como complemento del estudio elaborado por INDUCONS EIRL en enero y agosto del 2010.

El estudio geotécnico del 2011, se realizó en la zona del proyecto una evaluación de potencial de licuación siguiendo los lineamientos establecidos internacionalmente sobre este fenómeno (1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils resumidos por Youd et al., 2001) el cual utiliza los valores de N del ensayo SPT para determinar la resistencia cortante cíclica del suelo, la magnitud del sismo y la aceleración máxima del terreno para determinar el esfuerzo inducido por la sollicitación dinámica. Para este análisis se consideró un valor de magnitud sísmica  $M_w=7.5$  y una aceleración sísmica de  $0.30g$ .



Tabla 4.21: Datos de Exploración SPT-01 - Chimbote

Penetración (m)	Nº golpes (N)	N corregido (N60)	Clasificación SUCS	Contenido de humedad (%)
1.40 - 1.85	10	10	SP	16.87
2.55 - 3.00	7	7	SM	34.28
3.70 - 4.15	28	16	SP-SM	21.84
4.90 - 5.35	100	58	SP	17.42

Exploración (27/01/2010)

Penetración (m)	Nº golpes (N)	N corregido (N60)	Clasificación SUCS	Contenido de humedad (%)
3.10 - 3.55	7	7	ML	28.24
4.10 - 4.55	15	13	SM	31.86
5.00 - 5.45	36	33	SP-SM	24.94
6.05 - 6.50	9	7	SP	28.71
7.15 - 7.60	19	14	SP	24.06
8.00 - 8.45	29	23	SP	23.02
9.15 - 9.60	14	10	SP	18.92
10.00 - 10.45	83	61	SP	13.16
11.15 - 11.60	109	76	SP-SM	37.45
12.10 - 12.55	133	87	SP-SM	38.44

Exploración (23/07/2010)

SPT-01N: Ejecutado en abril 2011. El nivel freático se encuentra a 2.2m de profundidad. Perfil predominante de arena, entre arenas limosas, arcillosas y pobremente gradadas.

Tabla 4.22: Datos de Exploración SPT-01N - Chimbote

Profundidad	Resultados de Exploración
0.20m - 3.00m	Arena limosa pobremente gradada (SP-SM). Compacidad Suelta, baja humedad y con valores de N de 2 a 5 golpes
3.00m - 4.00m	Alternancia de Arenas limosas (SM) y limo arcilloso (SC). Compacidad suelta y alta humedad. Registró un valor de N de 10 golpes.

4.00m - 5.00m	Arenas limosas pobremente gradada (SP-SM) Compacidad medianamente densa, alta humedad. Registró disminución en el valor de N hasta 4 golpes.
5.00m - 6.00m	Arenas limosas pobremente gradada (SP-SM) Compacidad medianamente densa, saturada. Registró un valor de N de 46 golpes.
6.00m - 7.00m	Arenas limosas pobremente gradada (SP-SM) Compacidad medianamente densa. Registró el valor de N de más de 50 golpes.
7.00m - 10.00m	Alternancia de Arenas limosas (SM) y Arenas pobremente gradadas con limos (SP-SM). Compacidad medianamente suelta a densa. Se encontraron restos de conchas marinas. Registró de valores de N entre 36 a 45 golpes.
10.00m - 12.05m	Arena pobremente gradada con limos (SP-SM). Compacidad muy densa. Se encontraron valores de N, del cono Peck, de 39 y 59 golpes.

**SPT-02N:** Ejecutado en abril 2011. El nivel freático se encuentra a 2.0m de profundidad. Perfil predominante de arena, entre arenas limosas, arcillosas y pobremente gradadas.

Tabla 4.23: Datos de Exploración SPT-02N - Chimbote

<b>Profundidad</b>	<b>Resultados de Exploración</b>
0.20m - 2.45m	Arena pobremente gradada con limos (SP-SM). Compacidad Suelta y con valores de N de 4 golpes
2.45m - 3.00m	Arena pobremente gradada con limos (SP-SM). Compacidad Suelta, humedad baja.
3.00m - 4.00m	Alternancia de Arenas limosas (SM) y Arenas pobremente gradadas con limos (SP-SM). Compacidad densa, baja humedad. Registró un valor de N de 6 golpes.
4.00m - 5.00m	Alternancia de Arenas limosas (SM) y Arenas pobremente gradadas con limos (SP-SM). Compacidad suelta a medianamente densa. Registró un valor de N de 11 golpes.
5.00m - 6.00m	Arenas pobremente gradada con limos (SP-SM) Compacidad densa. Registró un valor de N de más de 50 golpes.
6.00m - 7.00m	Arena arcillosa (SC) con presencia de restos marinos y gravillas. Compacidad muy densa. Registró el valor de N de más de 50 golpes.

7.00m - 8.00m	Arenas gruesa con presencia de limos (SM) y gravillas aisladas de tamaño menor a 1/2". Compacta. Registró de valores de N entre 26 a 27 golpes.
8.00m - 11.00m	Arena pobremente gradada con limos (SP-SM) con presencia de restos marinos y gravillas. Compacidad muy densa y saturada. Se encontraron valores de N de más de 50 golpes.
11.00m - 11.50m	Arena pobremente gradada con limos (SP-SM) con presencia de gravillas aisladas menor a 1/2". Compacidad densa. Se encontraron valores de N de más de 50 golpes.

**SPT-03N:** Ejecutado en abril 2011. El nivel freático se encuentra a 3.3m de profundidad. Perfil predominante de arena, entre arenas limosas, arcillosas y pobremente gradadas.

Tabla 4.24: Datos de Exploración SPT-03N – Chimbote

<b>Profundidad</b>	<b>Resultados de Exploración</b>
0.50m - 2.00m	Alternancia de arena fina (SP) y arena limosa (SM). Compacidad Suelta y con valores de N de 4 golpes
2.00m - 3.00m	Arena pobremente gradada con limos (SP-SM). Compacidad Suelta, humedad baja. Registro de valores de N de 3 golpes.
3.00m - 4.00m	Alternancia de Arenas limosa-arcillosa (SC-SM) y Arenas pobremente gradadas con limos (SP-SM). Compacidad suelta. Registró un valor de N de 7 golpes.
4.00m - 5.00m	Arena con presencia de arcilla de plasticidad media (SP-SC), compacidad densa. Registró una baja del valor de N a 4 golpes.
5.00m - 7.00m	Arenas pobremente gradada con limos (SP-SM) Compacidad densa. Registró un valor de N de 43 a más de 50 golpes.
7.00m - 8.00m	Arena fina con presencia de limos (SP-SM) . Compacta. Registró de valores de N de 20 golpes.
8.00m - 10.00m	Alternancia de arena limosa (SM) y arena pobremente gradada con limos (SP- SM), de compacidad densa a muy densa. Se encontraron valores de N de más de 50 golpes.
10.00m - 12.45m	Arena pobremente gradada con limos (SP-SM). Compacidad muy densa. Se encontraron valores de N de más de 50 golpes.

**SPT-04N:** Ejecutado en abril 2011. El nivel freático se encuentra a 2.0m de profundidad. Perfil predominante de arena, entre arenas limosas, arcillosas y pobremente gradadas.

Tabla 4.25: Datos de Exploración SPT-04N - Chimbote

<b>Profundidad</b>	<b>Resultados de Exploración</b>
0.45m - 3.00m	Alternancia de arena media a gruesa (SP) y limo arenoso (ML). Compacidad Suelta y plasticidad media respectivamente. Registro con valores de N de 2 a 6 golpes
3.00m - 4.00m	Arena media a gruesa (SP) de compacidad suelta. Registro un valor de N de 7 golpes.
4.00m - 5.00m	Arena pobremente gradada con limos (SP-SM). Compacidad suelta y húmeda. Se encontraron valores de N de 16 golpes.
5.00m - 6.00m	Arenas pobremente gradada (SP) Compacidad densa, húmeda. Registro un valor de N de 44 golpes.
6.00m - 7.00m	Arenas pobremente gradada media gruesa (SP) de compacidad densa. Presencia de restos marinos. Registro un valor de N de 47 golpes.
7.00m - 8.00m	Arenas pobremente gradada media gruesa (SP), compacta. Registro un valor de N de 27 golpes.
8.00m - 12.00m	Arena pobremente gradada con limos (SP-SM). Compacidad densa, húmeda, con presencia de grava aislada menor de 1/4". Se encontraron valores de N de más de 47 golpes.

SPT-05N: Ejecutado en abril 2011. El nivel freático se encuentra a 2.5m de profundidad. Perfil predominante de arena, entre arenas limosas, arcillosas y pobremente gradadas.

Tabla 4.26: Datos de Exploración SPT-05N - Chimbote

<b>Profundidad</b>	<b>Resultados de Exploración</b>
0.40m - 2.00m	Arena pobremente gradada con limos (SP-SM). Compacidad suelta y húmeda. Se encontraron valores de N de 8 golpes.
2.00m - 4.00m	Arena pobremente gradada con limos (SP-SM). Compacidad suelta y húmeda. Presencia de material orgánico. Se encontraron valores de N entre 2 a 5 golpes.
4.00m - 8.00m	Arena pobremente gradada con limos (SP-SM). Compacidad suelta a densa. Presencia de gravilla aislada. Se encontraron valores de N de 6 a mas de 50 golpes.
8.00m - 9.00m	Arenas con presencia de limos (SP-SM), compacta. Presencia de gravilla aislada menor de 1/4". Presencia de restos marinos. Registro un valor de N de 25 golpes.

---

9.00m - 10.00m	Arenas con presencia de limos (SP-SM), compacta. Presencia de restos marinos. Registro un valor de N de más de 50 golpes.
10.00m - 12.45m	Arena pobremente gradada con limos (SP-SM). Compacidad densa, con presencia de restos marinos y de grava aislada menor de 1/4". Se encontraron valores de N de más de 50 golpes.

**MASW-08:** Medición de velocidades de ondas S en una Línea Sísmica de 53m de longitud donde se encontró en el centro de la línea dos estratos sísmicos: Primer estrato con una profundidad de 3.7m se encontró un rango de Ondas S ( $V_s$ ) entre 97 m/seg a 143 m/seg que corresponde a una arena de compacidad suelta. A continuación, un segundo estrato con un espesor de 21.3m encontrándose un rango entre 196 m/seg a 396 m/seg que corresponde a una arena de compacidad media a densa.

**MASW-09:** Medición de velocidades de ondas S en una Línea Sísmica de 53m de longitud donde se encontró en el centro de la línea dos estratos sísmicos: Primer estrato con una profundidad de 3.7m se encontró un rango de Ondas S ( $V_s$ ) entre 86 m/seg a 136 m/seg que corresponde a una arena de compacidad suelta. A continuación, un segundo estrato con un espesor de 21.3m encontrándose un rango entre 184 m/seg a 430 m/seg que corresponde a una arena de compacidad media a densa.

**MAM-02:** Medición de velocidades de ondas S en una Línea Sísmica de 100m de longitud donde se encontró en el centro de la línea tres estratos sísmicos: Primer estrato con una profundidad de 5.4m se encontró un rango de Ondas S ( $V_s$ ) entre 95 m/seg a 143 m/seg que corresponde a una arena de compacidad suelta. A continuación, un segundo estrato con un espesor de 13.5m encontrándose un rango entre 187 m/seg a 393 m/seg que corresponde a una arena de compacidad media a densa. Finalmente, un tercer estrato con un espesor de 49.5m encontrándose un rango entre 419 m/seg a 715 m/seg que corresponde a una arena de compacidad muy densa



**b) Bloque D1, D2 y D3**

Cercano a esta zona del proyecto se encuentra las exploraciones SPT-02, SPT-03N y SPT-04N, conjuntamente con las exploraciones geofísicas MASW S-10 y S-11.

La evaluación de Potencial de Licuación para esta zona se encuentra en función de las exploraciones SPT-03N y SPT-04N, donde se establece como estrato licuable a una profundidad entre 3m y 4m.

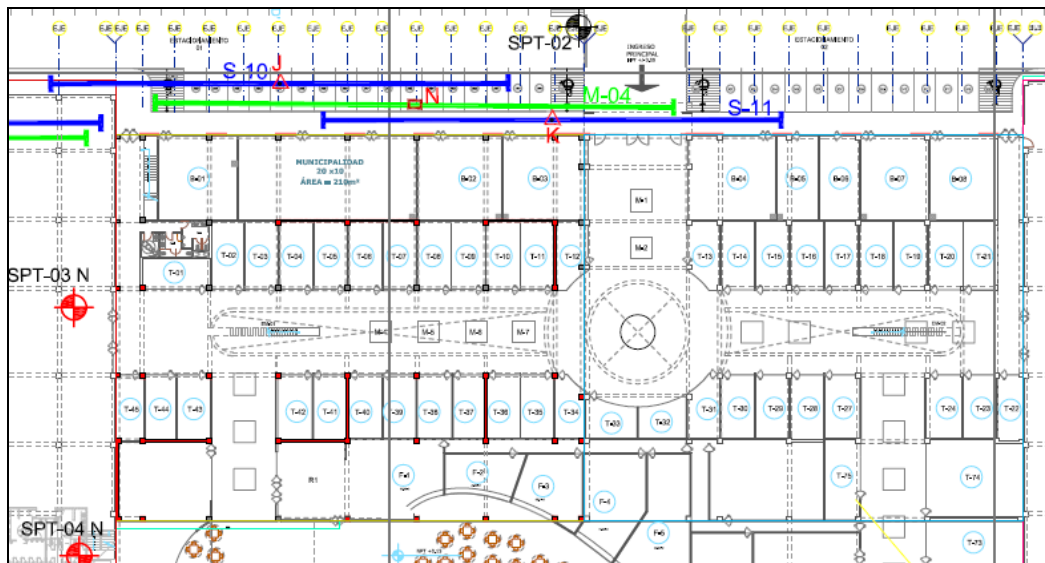


Figura 4.14: Ubicación de Exploración Geotécnica-Geofísica Bloque D - Chimbote

Datos Generales SPT-02:

Nivel Freático -2.10m (28/01/2010) / -1.90m (25/07/2010)

Tabla 4.27: Datos de Exploración SPT-02 – Chimbote

Penetración (m)	Nº golpes (N)	N corregido (N60)	Clasificación SUCS	Contenido de humedad (%)
1.50 - 1.95	8	8	SP	22.69
3.85 - 4.30	2	2	SP-SM	21.09
5.10 - 5.55	98	67	SP	23.14

Exploración (28/01/2010)

Penetración (m)	Nº golpes (N)	N corregido (N60)	Clasificación SUCS	Contenido de humedad (%)
2.20 - 2.65	3	3	ML	40.625
3.05 - 3.50	5	4	SP	23.377
4.15 - 4.60	33	30	SP	18.136
5.35 - 5.80	80	66	SP	19.429
6.20 - 6.65	6	4	SM	22.082
7.00 - 7.45	27	22	SP	21.762
8.20 - 8.65	104	80	SP	15.696
9.10 - 9.55	32	23	SP-SM	12.865
10.15 - 10.60	119	83	SP	26.957
11.5 - 11.95	133	87	SP	25.641

Exploración (25/07/2010)

SPT-03N: Ejecutado en abril 2011. El nivel freático se encuentra a 3.3m de profundidad. Perfil predominante de arena, entre arenas limosas, arcillosas y pobremente gradadas. Los resultados de la exploración son resumidos en la Tabla 4.28.

SPT-04N: Ejecutado en abril 2011. El nivel freático se encuentra a 2.0m de profundidad. Perfil predominante de arena, entre arenas limosas, arcillosas y pobremente gradadas. Los resultados de la exploración son resumidos en la Tabla 4.29.

MASW-10: Medición de velocidades de ondas S en una Línea Sísmica de 53m de longitud donde se encontró en el centro de la línea dos estratos sísmicos: Primer estrato con una profundidad de 3.7m se encontró un rango de Ondas S ( $V_s$ ) entre 110 m/seg a 149 m/seg que corresponde a una arena de compacidad suelta. A continuación, un segundo estrato con un espesor de 21.3m encontrándose un rango entre 173 m/seg a 411 m/seg que corresponde a una arena de compacidad media a densa.

MASW-11: Medición de velocidades de ondas S en una Línea Sísmica de 53m de longitud donde se encontró en el centro de la línea dos estratos sísmicos: Primer estrato con una profundidad de 3.7m se encontró un rango de Ondas S ( $V_s$ ) entre 88 m/seg a 144 m/seg que corresponde a una arena de compacidad suelta. A continuación, un segundo estrato con un

espesor de 21.3m encontrándose un rango entre 173 m/seg a 405 m/seg que corresponde a una arena de compacidad media a densa.

**c) Bloque A2**

Cercano a esta zona del proyecto se encuentra las exploraciones SPT-03, conjuntamente con las exploraciones geofísicas MASW S-01 y MAM M-03.

La evaluación de Potencial de Licuación para esta zona no es posible analizar directamente debido a que no existen exploraciones en esta zona por lo que por lo encontrado en el Bloque D se establece de manera referencial como estrato licuable a una profundidad entre 3m y 4m.

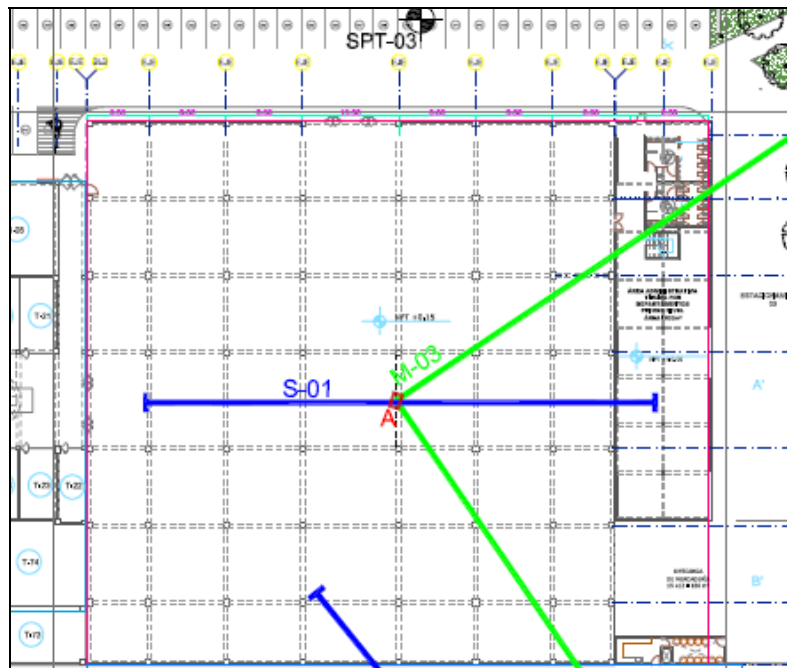


Figura 4.15: Ubicación de Exploración Geotécnica-Geofísica Bloque A2 - Chimbote

Datos Generales SPT-03: Nivel Freático -2.10m (28/01/2010)

Tabla 4.28: Datos de Exploración SPT-03 - Chimbote

Penetración (m)	Nº golpes (N)	N corregido (N60)	Clasificación SUCS	Contenido de humedad (%)
1.10 - 1.55	5	5	SP	28.215
3.40 - 3.85	4	3	SM	22.290
4.30 - 4.75	43	35	SP-SM	23.906
5.50 - 5.95	97	58	SP	21.445

MASW-01: Medición de velocidades de ondas S en una Línea Sísmica de 53m de longitud donde se encontró en el centro de la línea dos estratos sísmicos: Primer estrato con una profundidad de 5.2m se encontró un rango de Ondas S ( $V_s$ ) entre 84 m/seg a 143 m/seg que corresponde a una arena de compacidad suelta. A continuación, un segundo estrato con un espesor de 19.8m encontrándose un rango entre 171 m/seg a 400 m/seg que corresponde a una arena de compacidad media a densa.

MAM-03: Medición de velocidades de ondas S en una Línea Sísmica de 100m de longitud donde se encontró en el centro de la línea tres estratos sísmicos: Primer estrato con una profundidad de 5.6m se encontró un rango de Ondas S ( $V_s$ ) entre 90 m/seg a 147 m/seg que corresponde a una arena de compacidad suelta. A continuación, un segundo estrato con un espesor de 18.6m encontrándose un rango entre 165 m/seg a 364 m/seg que corresponde a una arena de compacidad media a densa. Finalmente, un tercer estrato con un espesor de 76.8m encontrándose un rango entre 415 m/seg a 750 m/seg que corresponde a una arena de compacidad muy densa

### 4.3.3 Características de los Pilotes Ensayados

Los pilotes ensayados fueron elaborados de concreto armado con una sección cuadrada de lado 400 mm.

El concreto armado especificado para los pilotes tiene un  $f'c$  igual a 28 MPa.

Para el material del pilote fue adoptado peso específico de 2,45 ton/m<sup>3</sup> y módulo de elasticidad de 361 ton/cm<sup>2</sup>, correspondiente a una velocidad de propagación de la onda de

---

3800 m/s. El pilote tiene en toda su longitud una sección transversal maciza de 1600 cm<sup>2</sup> y perímetro 1.60m.

Las especificaciones técnicas del proyecto para los pilotes ejecutados en la primera etapa requieren una longitud de empotramiento con respecto a la superficie de terreno de 6.0m y una profundidad efectiva entre 4.8m a 5.1m y una Carga de Trabajo a Compresión de **70 ton**. Posteriormente se realizaron ensayos de carga dinámicos para pilotes con mayores longitudes de empotramiento.

Los impactos para la instalación fueron realizados mediante martillo Diesel Simple Acción, en este proyecto se utilizaron para el último tramo de penetración uno de los siguientes equipos:

- a) DELMAG Tipo D-12, con una masa de 1.2 toneladas y capaz de suministrar una energía máxima de 3.125 ton-m, la velocidad trabajo es entre 40 a 56 golpes por minuto según información del fabricante.
- b) DELMAG Tipo D-30, con una masa de 3.0 toneladas y capaz de suministrar una energía máxima de 8.256 ton-m, la velocidad trabajo es entre 40 a 56 golpes por minuto según información del fabricante.

#### **4.3.4 Resultados de Pruebas de Carga Estática**

Los pilotes ensayados mediante prueba de carga estática (ASTM D1143), serán evaluados hasta una carga de 140 ton. Las fechas de ejecución de los ensayos fueron en febrero y marzo del 2011.

A continuación se muestra las características adicionales de los pilotes:

Tabla 4.29: Características de los Pilotes Ensayados PCE Compresión – Chimbote

Identificación del Pilote	Longitud Empotrada (m)	Martillo Hincapilotes usado en último tramo	Últimas Relaciones de Penetración (Nro. Golpes/ 0.10m)
P-0694 (Eje 7J y 8J) BLOQUE D1	6.00 aprox.	DELMAG D12	Mayor a 100
P-0691 (Eje 4KA) BLOQUE A2			No se tiene información
EJE 1D y 1E BLOQUE A1			

El sistema de aplicación de carga fue mediante un cilindro hidráulico de 500 toneladas de capacidad, marca BAUER-LEONHART.

El sistema utilizado está compuesto por un par de vigas tipo “H”, apoyadas en sus extremos por pilotes, rigidizadas por un entramado triangular de tuberías. El sistema se encuentra fijo por el peso de pilotes de concreto armado apoyados en la viga de reacción (figura 4.16).



Figura 4.16: Vista de Sistema de Reacción de PCE - Chimbote

De acuerdo a las lecturas realizadas se establece las curvas Carga y Descarga vs. Deformación del cabezal del pilote como resultante directo de la prueba de carga estática, en la Figura 4.17 se ha considerado la recta del Método de Davisson para la estimación de capacidad de carga última con las proyecciones de las curvas obtenidas durante el ensayo:

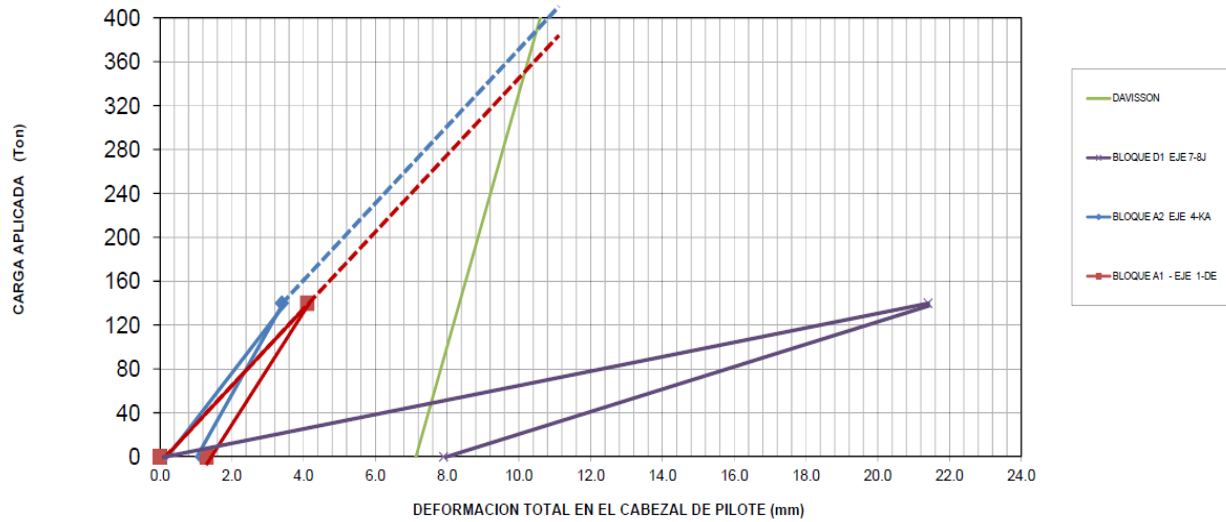


Figura 4.17: Curvas Carga Aplicada vs Deformación Total PCE Compresión – Chimbote

De acuerdo al Método de Davisson se obtiene como Capacidad de Carga Última de la interacción Suelo-Pilote para los pilotes en los bloques A1, A2 y D1 los valores de 350 ton, 380 ton y 50 ton con una deformación máxima en el cabezal del pilote de 10.20 mm, 10.30mm y 7.00mm respectivamente.

A continuación se muestra el proceso de instrumentación de estos pilotes, en la Figura 4.18 se puede apreciar la viga principal del sistema de reacción, el pilote a ensayar y el martillo hincapilotes utilizado para la producción (parte izquierda) y el sistema de reacción y aplicación de carga para el ensayo (parte derecha):



Figura 4.18: Registro Fotográfico del Proceso de PCE Compresión - Chimbote

### 4.3.5 Resultados de Pruebas de Carga Dinámica

Los pilotes ensayados mediante prueba de carga dinámica (ASTM D 4945) fueron realizados los días 1 y 2 de julio del 2011. El ensayo dinámico fue ejecutado con un equipo Analizador de Hínca de Pilotes (PDA en su sigla en inglés) fabricado por Pile Dynamics, Inc. de Cleveland, Ohio, Estados Unidos. Los sensores del mismo fabricante encargados de la medición son:

- Deformómetros: E398, I516 y I543
- Acelerómetros (Piezoeléctricos): 32203 y 32204

En este caso, se realizaron ensayos a los pilotes de refuerzo de acuerdo a un análisis de licuación de la zona. Las características de los pilotes ensayados son los siguientes:

Tabla 4.30: Características de los Pilotes Ensayados PDA – Chimbote

Identificación del Pilote	Longitud Total (m)	Longitud bajo los sensores (m)	Tres Últimos Ratios de Penetración (Nro. Golpes/ 0.10m)	Penetración en el Suelo (m)	
				Inicial	Final
P9-002-C5 BLOQUE A1	9.00	8.30	68-70-72	0.80	7.43
P9-003-C5 BLOQUE A1	9.00	8.30	47-63-66	0.70	7.10
P9-004-C3 BLOQUE A1	8.55	7.85	18-20-26	4.42	7.02

El sistema de impacto utilizado durante el ensayo es un DELMAG Tipo D-30, con una masa de 3.0 tonelada y capaz de suministrar una energía máxima de 8.256 ton-m, la velocidad trabajo es entre 40 a 56 golpes por minuto según información del fabricante.

Al realizar el análisis CAPWAP para cada uno de los pilotes se tiene los siguientes resultados resumen:



Tabla 4.31: Resultados de Análisis CAPWAP – Chimbote

Identificación del Pilote	Golpe Nro.	Evento	Fricción de Manto (ton)	Resistencia de Punta (ton)	Capacidad total (ton)
P9-002-C5 BLOQUE A1	1480/1493	Ensayo PDA durante la instalación	205.0	171.6	376.6
P9-003-C5 BLOQUE A1	1891/1898	Ensayo PDA durante la instalación	134.5	191.9	326.3
P9-004-C3 BLOQUE A1	553/555	Ensayo PDA en rehinca a los 1 días	181.3	162.3	343.7

En la Tabla 4.32 se muestra la capacidad máxima movilizada en el ensayo correlacionado con la penetración total del pilote en el suelo, deformación máxima axial (DMX) y la energía transferida (EMX) en el golpe analizado por CAPWAP:

Tabla 4.32: Capacidad de Carga Máxima – Chimbote

Identificación del Pilote	Penetración en el suelo final (m)	Desplazamiento Total DMX (mm)	Asentamiento Permanente Observado (mm)	Energía Transf. EMX (ton.m)	Capacidad Movilizada (ton)	
					Compresión	Tracción
P9-002-C5 BLOQUE A1	7.43	11.44	1.38	4.14	<b>376.6</b>	<b>120.12</b>
P9-003-C5 BLOQUE A1	7.10	11.35	1.59	3.18	<b>326.3</b>	<b>134.33</b>
P9-004-C3 BLOQUE A1	7.02	12.92	3.85	4.28	<b>343.7</b>	<b>113.61</b>

En la Tabla 4.32 se está colocando la capacidad de carga movilizada a compresión u obtenida durante el ensayo. Utilizando el Método de Davisson con una proyección de la curva encontrada la capacidad del pilote última promedio sería 313 ton con un desplazamiento máximo promedio en el cabezal de 9.80 mm.

La capacidad de carga a tracción fue estimada a partir de la fricción de manto determinada por el análisis CAPWAP. Para la determinación de la capacidad a tracción, la fricción estará afectada por un factor de reducción igual a 0,70.

A continuación se presentan los valores máximos de las tensiones medidas en la región de los sensores durante el ensayo dinámico:

Tabla 4.33: Esfuerzos durante el ensayo dinámico – Chimbote

Identificación del Pilote	Esfuerzo de Compresión - media de los 4 sensores (CSX) MPa	Esfuerzo de Compresión - máxima de los 4 sensores (CSI) MPa	Esfuerzo de Tracción (TSX) MPa
P9-002-C5 BLOQUE A1	29,50	32,50	0,50
P9-003-C5 BLOQUE A1	22,00	29,80	0,20
P9-004-C3 BLOQUE A1	26,70	27,90	0,10

En la siguiente figura se muestra la modelación del comportamiento estático calculado en base a los resultados del ensayo dinámico mediante curvas Carga y Descarga vs. Deformación Total a nivel de cabezal del pilote (zona de colocación de sensores) incluyendo la recta del Método de Davisson:

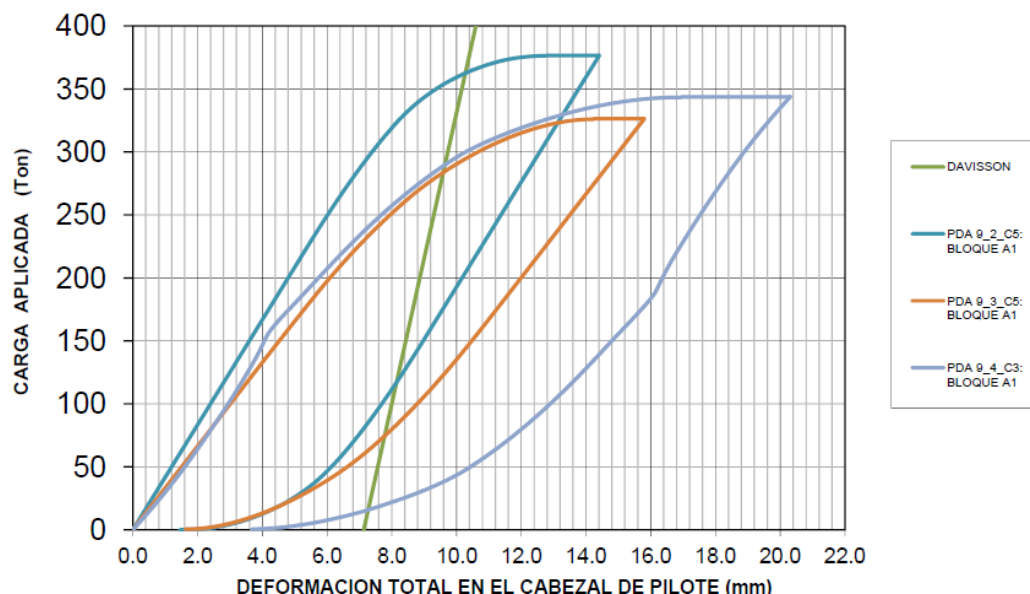


Figura 4.19: Curvas Carga Aplicada vs Deformación Total calculada por PDA – Chimbote

A continuación se muestra el proceso de instrumentación de estos pilotes, en la Figura 4.20 se puede apreciar los sensores instalados en el pilote (parte izquierda) y el proceso de aplicación de carga mediante martillo hincapilotes (parte derecha):



Figura 4.20: Registro Fotográfico del Proceso de Prueba de Carga Dinámica - Chimbote

## CAPÍTULO V

### COMPARATIVA Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se realizó un análisis consistente en comparar y discutir los resultados obtenidos de las pruebas de carga mostradas anteriormente.

#### 5.1 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES GEOTÉCNICAS Y PILOTES DE LOS CASOS ESTUDIADOS.

Los casos estudiados en la presente tesis muestran zonas geográficas y estratigrafía distintas. En los tres casos los pilotes son del tipo desplazantes ya que sus puntas se encuentran cerradas produciendo un efecto de empuje y alteración del suelo durante su instalación por hincado.

- En el Caso I (Iquitos), se presentan pilotes de empotramiento de 6.0m con un perímetro de contacto de 1.0174m y un área de punta cerrada de 823.716 cm<sup>2</sup>. El pilote se encuentra en un suelo arcilloso de media a alta plasticidad de consistencia blanda a medio (CL-CH) en toda su longitud, y su punta se apoya en una arena fina pobremente gradada de compacidad media a densa (SP /SP-SM). Los pilotes son circulares de acero estructural.
- En el Caso II (Rioja), se presentan pilotes de empotramiento de 25.0m con un perímetro de contacto de 1.600m y un área de punta cerrada de 1,600 cm<sup>2</sup>. El pilote se encuentra en un suelo cohesivo de baja a media consistencia (CL) con estratos intercalados orgánicos de alta plasticidad (OH) en toda su longitud, y su punta se apoya en una arena fina pobremente gradada de compacidad densa a muy densa (SP-SM). Los pilotes son cuadrados de concreto armado.
- En el Caso III (Chimbote), se presentan pilotes de empotramiento entre 6.0m a 9.0m con un perímetro de contacto de 1.600m y un área de punta cerrada de 1,600 cm<sup>2</sup>. El pilote

se encuentra en un suelo arenoso pobremente gradados con limos de blando a denso (SP-SM) en toda su longitud y su punta. Los pilotes son cuadrados de concreto armado.

En la zona donde se realizaron los ensayos de carga, el suelo presenta una alta probabilidad de licuación entre 7m a 8m de profundidad.

Tabla 5.1: Resumen de Características Geotécnicas de los Casos Estudiados

Profundidad de Pilotes (m)	CASO I (Iquitos)		N SPT	CASO II (Rioja)		N SPT	CASO III (Chimbote)		N SPT
	Ø323.9mm			Lado 400.0mm			Lado 400.0mm		
0.00	CL	N.F.	-	CL	N.F.	-	SP-SM	N.F.	2
1.00	CL		12	CL		4	SP-SM		4
2.00	CL		11	CL		9	SP-SM		5
3.00	CL		14	SC/OH		1	SP-SM		10
4.00	CL		80	OL		7	SP-SM		4
5.00	CL		64	MH		6	SP-SM		46
6.00	SP-SM		68	SC/CL-ML		6	SP-SM		50
7.00				SM		24	SP-SM		36
8.00				OH/CL		5	SP-SM		50
9.00				CL/SC		7	SP-SM		>50
10.00				CL		7			
11.00				CL		7			
12.00				OH/CL		7			
13.00				OL		12			
14.00				OH		10			
15.00				OH		12			
16.00				MH /OH		8			
17.00				OH		11			
18.00				OL		11			
19.00				OL		9			
20.00				OH		10			
21.00				OH/CL-ML		29			
22.00				SM		27			
23.00				ML		50			
24.00				ML		56			
25.00				SP-SM		59			

De los estudios geotécnicos y de las longitudes instaladas se puede identificar que los pilotes del Caso I y II se encuentran en Suelo Cohesivo de blando a muy compacto apoyado en Suelo No Cohesivo muy compacto. Por otro lado, en el Caso III se encuentra en Suelo No Cohesivo en su totalidad que va de suelto a muy compacto.

En los tres casos estudiados el nivel freático se mantiene constante a una profundidad aproximada con respecto al nivel de terreno natural de 2.50m.

Por lo antes mencionado existen casos estudiados donde los suelos son cohesivos y no cohesivos. De acuerdo a otras investigaciones previas, debido al cambio que genera en el suelo el proceso de hincado es necesario realizar evaluaciones de capacidad de carga con un tiempo posterior a la instalación, en el caso de arenas se recomienda un aproximado de 7 días y en el caso de arcillas un periodo de 20 a 30 días. El mayor factor a tener en cuenta en esta alteración del suelo es el incremento de la presión de poros por la carga aplicada.

Los pilotes del Caso II y III tienen similitudes en sección y material de fabricación por lo que se reducen las variables para lograr una mejor comparación del comportamiento de los pilotes desplazantes o hincados con respecto a los tipos de suelos (cohesivo y no cohesivo).

## **5.2 COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN ENTRE CASOS DE ESTUDIOS.**

Coduto, D. (2001) indica que la interpretación de los resultados de ensayos de carga está basada en la curva carga y descarga vs deformación. El comportamiento de dicha curva para suelos cohesivos blandos muestra una identificada tendencia como se aprecia en la curva A de la figura 5.1, donde al llegar a un valor de carga, un aumento con variaciones pequeñas de ella, determinada una deformación creciente y alta, esto se puede apreciar en dicha caída de la curva; por otro lado, los pilotes en suelos no cohesivos compactos o en arcillas duras se presenta una curva de gran pendiente cuyo punto donde la carga genera deformaciones crecientes más altas es mucho mayor a las de los suelos cohesivos blandos, este comportamiento se muestra en la curva B de la Figura 5.1.

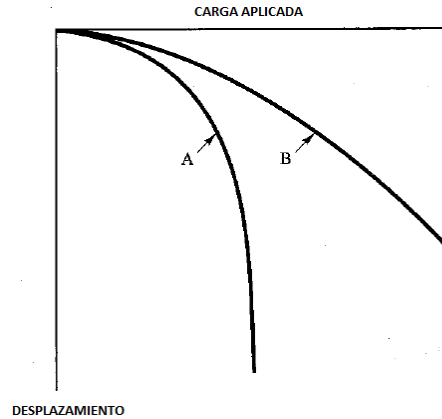


Figura 5.1: Comportamiento de la Curva Carga vs. Desplazamiento en función del tipo de suelo según Coduto, D. (2001)

En las secciones a continuación se muestran los resultados del comportamiento carga aplicada vs. deformación o desplazamiento total a nivel del cabezal del pilote para los distintos casos.

### 5.2.1 Pruebas de Carga Estática (PCE)

Considerando los resultados de las pruebas de carga estática se muestra la Curva Esfuerzo-Deformación en promedio para cada caso a continuación:

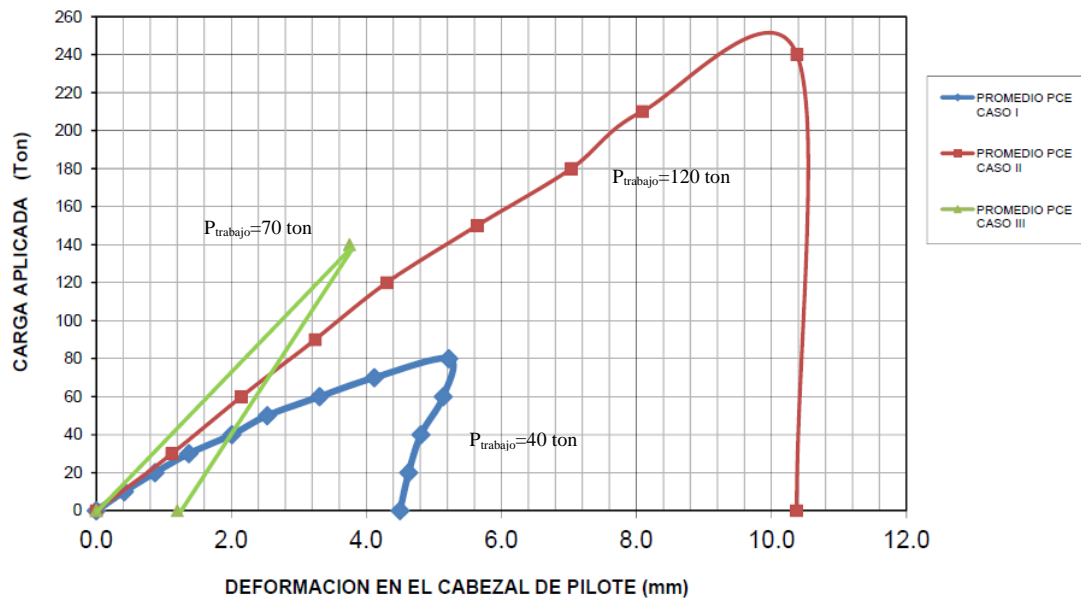


Figura 5.2: Curva Carga y Descarga vs. Desplazamiento de Resultados Promedio de PCE para cada Caso Estudiado

Las capacidades admisibles esperadas obtenidas de métodos teórico-prácticos fueron 40 ton, 120 ton y 70 ton para los casos I, II y III respectivamente. La energía suministrada estáticamente tiene como limitación el doble de la capacidad admisible.

Analizando el Comportamiento Esfuerzo-Deformación de los casos evaluados se puede ver la caída en la curva del Caso I donde la capacidad esperada es menor a los otros dos casos y el suelo es mayormente arcilloso o cohesivo. En los Casos II y III, la curva de comportamiento de la capacidad del pilote muestra una pendiente pronunciada a la vertical hacia capacidades últimas probables mucho mayores y la presencia de un suelo arcilloso y no cohesivo respectivamente.

Por el comportamiento del Caso I, se puede identificar cercano a los valores obtenidos la capacidad de carga última o de falla utilizando métodos relacionados con la proyección o el gráfico Esfuerzo-Deformación como el Método de Davisson. Por el comportamiento de los Casos II y III, se aprecia una proyección que origina una capacidad de carga última o de falla elevado por encima de los valores obtenidos en el ensayo utilizando métodos relacionados con la proyección o el gráfico Esfuerzo-Deformación como el Método de Davisson.

Las curvas obtenidas en los ensayos de los casos estudiados mostrados en la Figura 5.2, están verificando la teoría indicada por Coduto, D. (2001) resumida a principio de esta sección y esquematizada en la Figura 5.1.

### **5.2.2 Pruebas de Carga Dinámica (PDA)**

Considerando los resultados de las pruebas de carga dinámica se muestra la Curva Carga y Descarga vs. Deformación en promedio para cada caso a continuación:



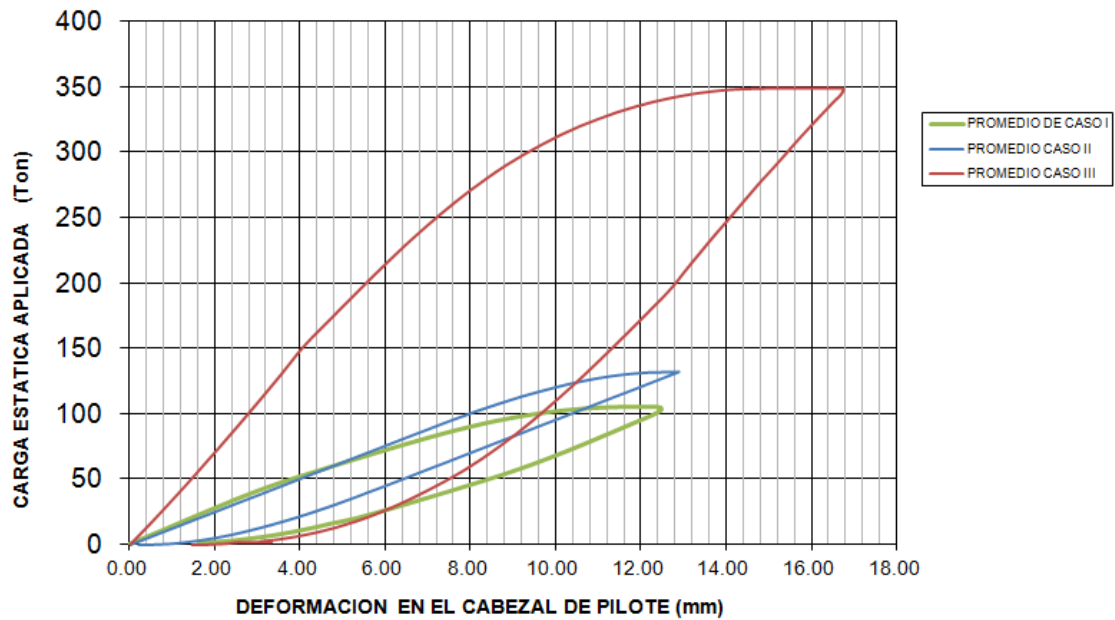


Figura 5.3: Curva Carga-Desplazamiento de Resultados Promedio de PDA para cada Caso Estudiado

Las cargas de ensayo estimadas en función de las pruebas de carga estática, las especificaciones técnicas de cada proyecto y los requerimientos técnicos fueron 80 ton, 240 ton y 300 ton para los casos I, II y III respectivamente.

En el Caso II, debido a que se utilizó un martillo hincapilotes de menor tamaño al utilizado en la instalación final del pilote, la energía aplicada durante el ensayo de carga estuvo por debajo de la carga requerida de ensayo y el comportamiento de la curva esfuerzo-desplazamiento es similar al Caso I, donde los esfuerzos resultantes máximos son cercanos.

Analizando el Comportamiento Esfuerzo-Deformación de los casos evaluados se puede ver la caída en la curva del Caso I y II donde la energía aplicada es menor al Caso III y el suelo es mayormente arcilloso o cohesivo. En el Caso III, la curva de comportamiento de la capacidad del pilote muestra una pendiente pronunciada a la vertical hacia capacidades últimas probables muchos mayores y la presencia de un suelo no cohesivo.

Las curvas obtenidas en los ensayos de los casos estudiados mostrados en la Figura 5.3, están verificando la teoría indicada por Coduto, D. (2001) resumida a principio de esta sección y esquematizada en la Figura 5.1.

A diferencia de las Pruebas de Carga Estática mencionadas en la sección anterior, el efecto de una menor energía aplicada durante el ensayo genera un comportamiento de menor capacidad de carga en los esquemas de esfuerzo-deformación como lo indica el Caso II.

### 5.2.3 Comparativo entre Pruebas de Carga Estática (PCE) y Carga Dinámica (PDA)

Considerando los resultados de las pruebas de carga estática y dinámica para cada caso estudiado se muestra la Curva Carga y Descarga vs. Deformación a continuación:

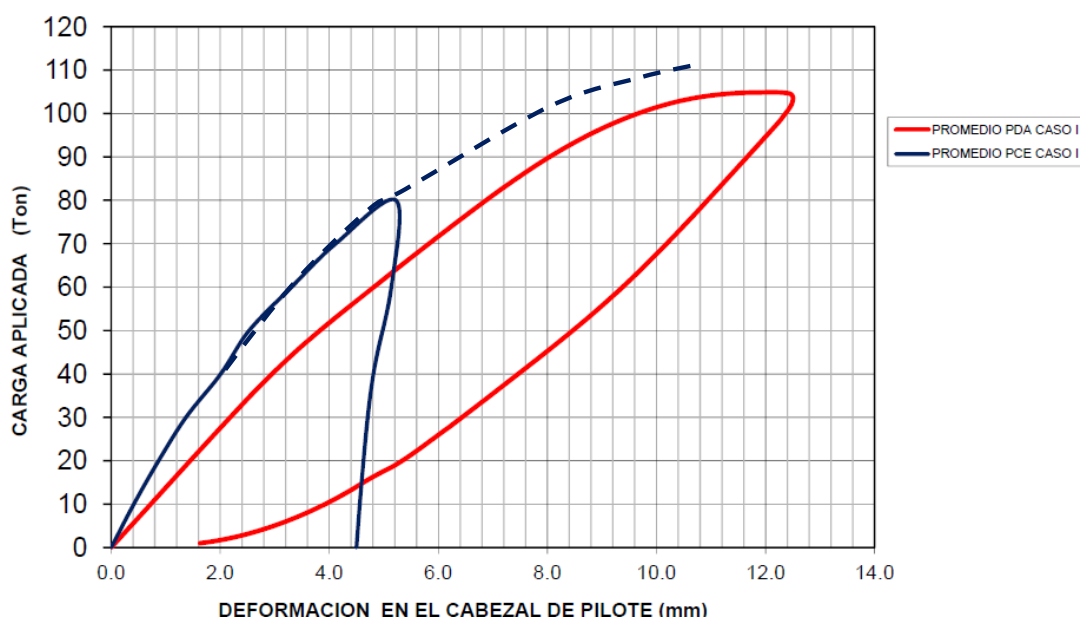


Figura 5.4: Curva Carga y Descarga vs. Deformación de resultados promedio entre PCE y PDA para Caso I -Iquitos

Para el Caso I, en la Figura 5.4, se han considerado resultados de ensayo de carga realizados a pilotes instalados con más de siete (7) días de reposo. En estas curvas se puede ver la similitud en el comportamiento de la curva para ambos ensayos de carga. Los esfuerzos estáticos aplicados u obtenidos en cada tipo de ensayo describen una línea similar, una proyección de la data de la PCE muestra mejor esta tendencia. Existe una

diferencia en el asentamiento definitivo posterior a cada ensayo, la PCE obtuvo un mayor desplazamiento permanente (4.2mm aprox.) que la PDA (1.8mm).

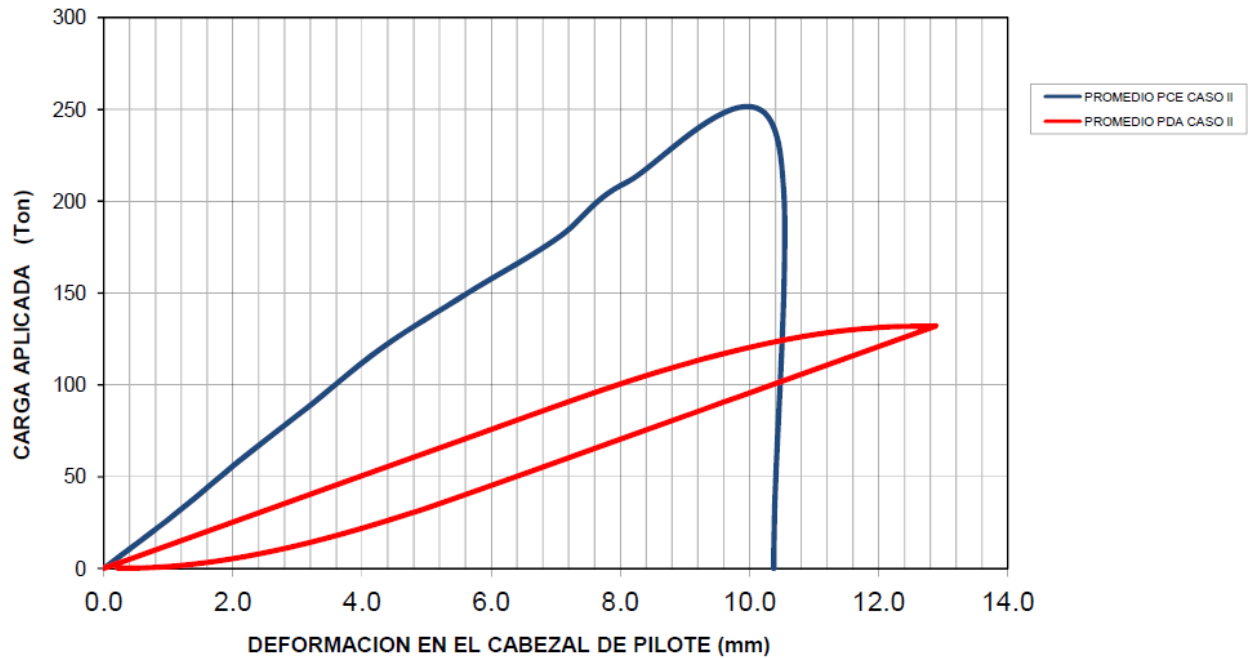


Figura 5.5: Curva Carga y Descarga vs. Deformación de resultados promedio entre PCE y PDA para Caso II -Rioja

Para el Caso II, en la Figura 5.5, se puede ver diferentes comportamientos entre los resultados de los ensayos de carga. Los esfuerzos estáticos aplicados u obtenidos en cada tipo de ensayo son diferentes, la PCE aplicó una mayor carga estática (hasta 240 ton aprox.) que la obtenida mediante el PDA (hasta 140 ton aprox.). Existe una diferencia en el asentamiento definitivo posterior a cada ensayo, la PCE obtuvo un mayor desplazamiento permanente (10.2mm) que la PDA, que casi no obtuvo asentamiento permanente.

En este caso se puede ver una relación con lo indicado por Coduto, D. (2001) en la Figura 5.1 para la carga aplicada y el comportamiento en un suelo arcilloso, de esto se puede integrar que una mayor energía aplicada desarrolla en igual medida la respuesta del suelo resultando una curva esfuerzo-desplazamiento con pendiente elevada a la vertical correspondiente a suelo cohesivo compacto a muy compacto; por otro lado, una menor

energía aplicada no desarrolla por completo el comportamiento del suelo por lo que conservadoramente se muestra una grafica con tendencia inclinada correspondiente a suelo cohesivo blando a compacto.

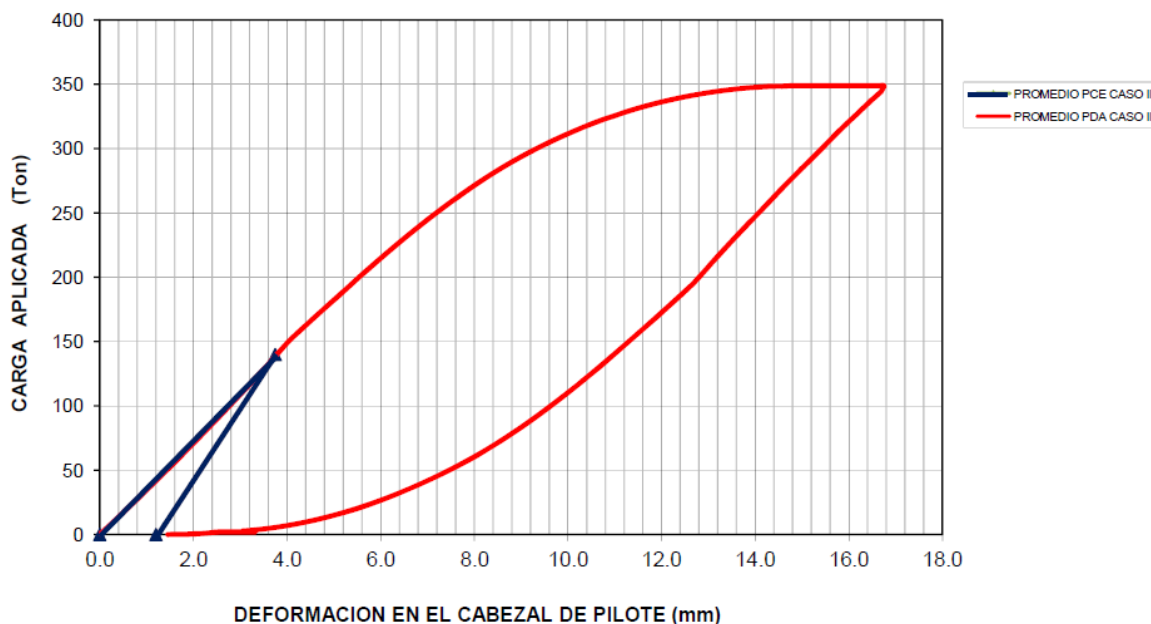


Figura 5.6: Curva Carga y Descarga vs. Deformación de resultados promedio entre PCE y PDA para Caso III- Chimbote.

Para el Caso III, en la Figura 5.6, se puede ver un comportamiento similar en las curvas esfuerzo-desplazamiento. Los esfuerzos estáticos máximos aplicados u obtenidos en cada tipo de ensayo son diferentes, la PDA aplicó una mayor carga total obteniendo una mayor carga estática (aprox. 350 ton) que es más del doble de la aplicada durante la PCE (aprox. 140 ton). No existe una diferencia importante en el asentamiento definitivo posterior a cada ensayo obteniéndose un aproximado de 1.6mm

De lo antes mencionado se puede evidenciar que para suelo cohesivo (Caso I & II), los asentamientos permanentes son más altos para PCE, donde la carga es aplicada estáticamente por un periodo de 24 horas, con respecto a las PDA. Por otro lado, las PDA en suelos no cohesivos (Caso III) muestran un asentamiento permanente similar al PCE. Estos valores encontrados no indican que existe diferencia en los desplazamientos permanentes entre ensayos cuando se ejecuta en suelos cohesivos, se podría inferir que el

causal de este comportamiento se deba a la generación del incremento de presión de poros (Condiciones No Drenadas) que se genera durante el PCE con la aplicación de carga de ensayo estática cuyo fenómeno no se presenta en suelos no cohesivos o cuando se aplican cargas de impacto donde el comportamiento del suelo son del tipo Drenadas.

### 5.3 COMPARATIVO DE CAPACIDADES DE CARGA ÚLTIMA ENTRE PDA & PCE.

A nivel internacional un registro comparativo de diversas tipologías entre ensayos PDA & PCE fueron mostrados por Likins G. (2004), obtenida por el apoyo de la Federal Highway Administration – USA (FHWA) donde los resultados de falla de la interacción suelo-pilote son obtenidos del uso del Método de Davisson y los ensayos fueron realizados posteriores al proceso de instalación o hincado.

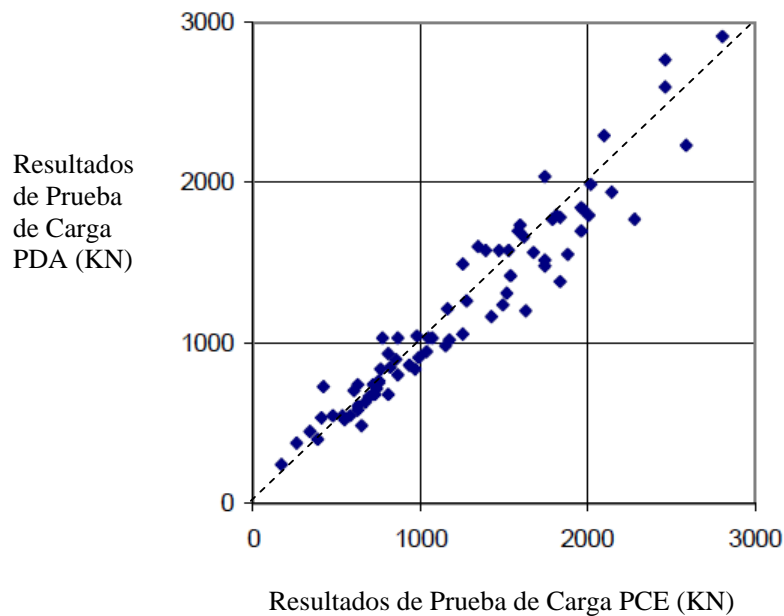


Figura 5.7: Resultado de Estudio de Correlación elaborado por Goble (1980).

En la Figura 5.7, se muestra la correlación encontrada por Goble (1980) obtenida de Likins G. (2004). La información proviene de 77 pilotes entre tubulares de acero con punta cerrada, acero perfil Tipo H, madera y concreto genera una correlación PDA/PCE de 1.010 y el coeficiente de variación de 0.168.

En la Figura 5.8, se muestra la correlación posteriormente encontrada por Likins G. con información desarrollada en 1996. La información proviene de 83 pilotes donde 36 pilotes son de acero y 13 de estos son tuberías genera una correlación PDA/PCE de 0.931 y el coeficiente de variación de 0.166.

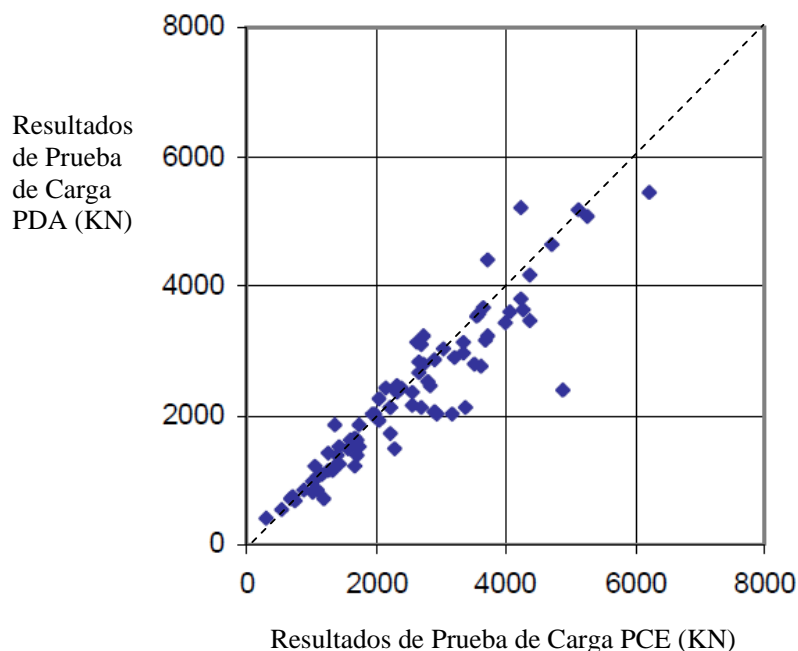


Figura 5.8: Resultado de Estudio de Correlación elaborado por Likins (1996).

Likins G. (2004) muestra la correlación de una compilación de distintos autores de una data proveniente de 119 pilotes hincados como se muestra en la Figura 5.9. La correlación PDA/PCE obtenida es 0.983 y el coeficiente de variación de 0.156.

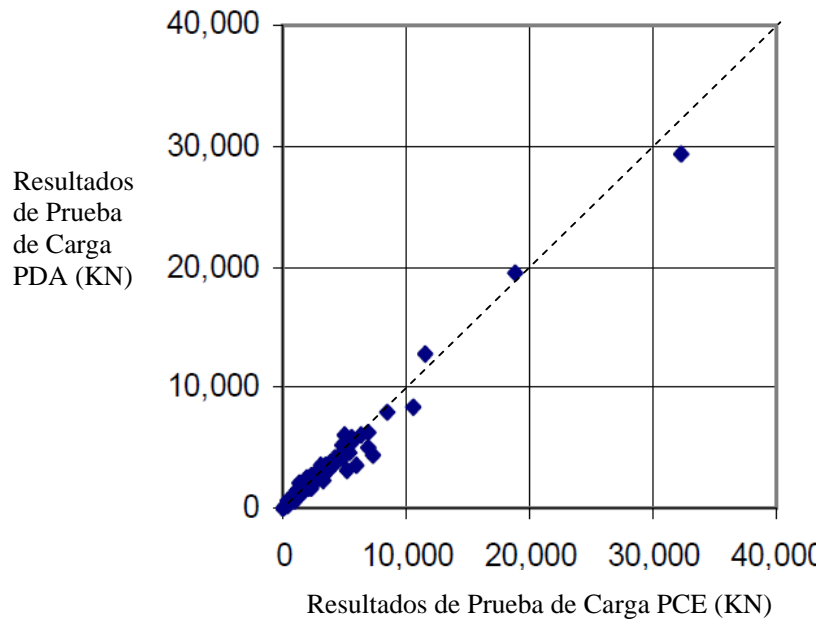


Figura 5.9: Resultado de Estudio de Correlación de compilación de información realizada por Likins D.

Para la presente investigación se ha considerado dos parámetros para la determinación de la Capacidad de Carga Última o de Falla del pilote como sigue:

- El pilote seleccionado tiene Desplazamiento Máximo del cabezal menos de 25.4mm (1pulgada)
- El Método de Davisson de la Curva Carga-Desplazamiento.

Por otro lado, no se está tomando la información del Caso II debido a que las cargas estáticas aplicadas y obtenidas en los respectivos ensayos son muy distintas para generar correlación de cargas últimas o falla de la interacción suelo-pilote.

Con respecto a los casos estudiados se ha considerado como base los resultados de PCE y su relación con los resultados de cada PDA, de lo cual se obtiene lo siguiente:

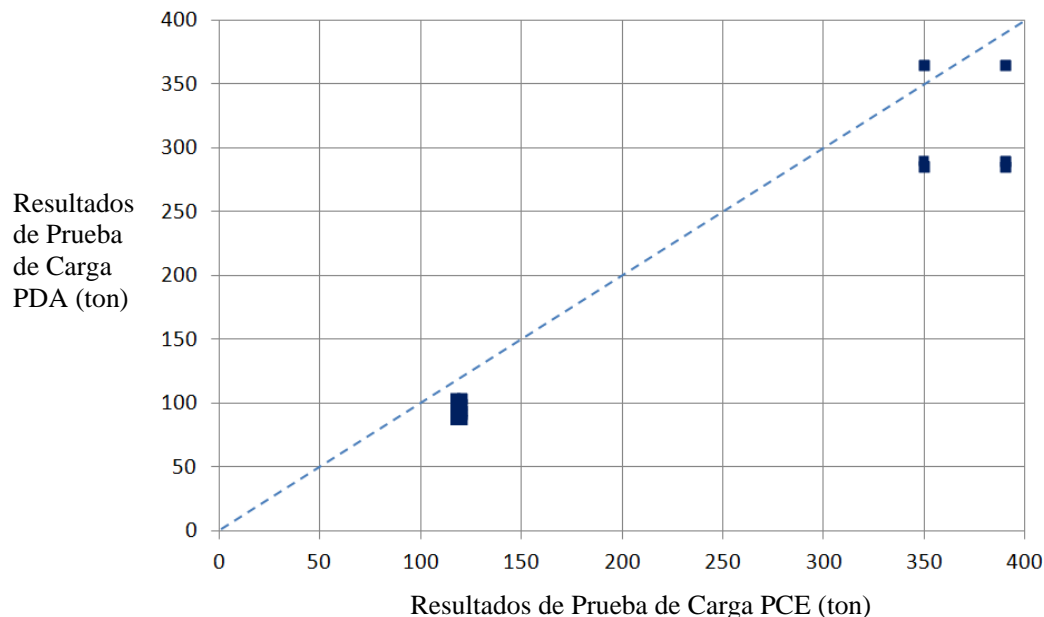


Figura 5.10: Resultado de Correlación de Casos Estudiados I & III

Tabla 5.2: Resultados de Correlación de Casos Estudiados I & III

Casos Estudiados	PCE (ton)	PDA (ton)	PDA/PCE	Promedio	Coefficiente de Variación	Observaciones
<b>CASO I IQUITOS</b>	117	105	0.897	0.821	0.069	
		100	0.855			
		95	0.812			Realizado en el mismo Pilote
		92	0.786			
		88	0.752			
	120	105	0.875	0.800		
		100	0.833			
		95	0.792			
		92	0.767			
		88	0.733			
<b>CASO III CHIMBOTE</b>	350	365	1.043	0.895	0.143	
		290	0.829			
		285	0.814			
	390	365	0.936	0.803		
		290	0.744			
		285	0.731			



La relación entre PDA y PCE de los casos estudiados es muy cercana mostrando un resultado de capacidades últimas de PDA con un rango de valores promedio menores en 15% y 19% que los PCE, teniendo en cuenta que la data utilizada tiene un coeficiente de variación del  $\pm 11\%$ . Realizando un promedio ponderado en función de la cantidad de PDA y PCE utilizados se diría que los resultados de PDA tienen una relación del 0.8265 con un coeficiente de variación promedio ponderado de  $\pm 10\%$ .

Por otro lado, las investigaciones internacionales muestran que los resultados de PDA tienen un rango de valores menores de entre 7% y 17% con respecto a los PCE, teniendo en cuenta que la data utilizada es hasta 25 veces mayor en cantidad que la utilizada en el presente documento y el coeficiente de variación promedio entre la data utilizada sería de  $\pm 16.5\%$ . Realizando un promedio ponderado en función de la cantidad de muestras utilizada se diría que los resultados de PDA tienen una relación de valores de 0.9616 respecto a los PCE con un coeficiente de variación promedio ponderado de  $\pm 16.01\%$ . Por otro lado existe data que indica que la relación de PDA/PCE es 1.010 y el coeficiente de variación de  $\pm 16.8\%$ . De realizarse un promedio ponderado total de esta data se encontraría una relación PDA/PCE igual a 0.975 y un coeficiente de variación de  $\pm 16.23\%$ .

Para los casos estudiados podría proponerse la siguiente ecuación:

$$1.21xPDA = 1xPCE \quad (5.1)$$

Para los casos internacionales recopilados en Likins G. (2004) podría proponerse la siguiente ecuación:

$$1.03xPDA = 1xPCE \quad (5.2)$$

La relación entre PDA y PCE obtenida en los casos estudiados se mantiene tanto para el tipo de suelo cohesivo (Caso I) y no cohesivo (Caso III), así como también para valores de carga última cercanos a 100 ton y a ensayos con resultados aproximados a 300 ton. Esto es respaldado por las investigaciones compiladas por Likins G. (2004).

Teniendo en cuenta una estructura diseñada por el Método de Esfuerzos Admisibles o por sus siglas en inglés ASD, el factor de seguridad utilizado para Pruebas de Carga Estática (PCE) tiene un valor de 2.0 y se podría considerar como base a los valores obtenidos de

estos. Es claro que el Factor de Seguridad está vinculado a probabilidades de ocurrencia del valor obtenido en los pilotes ensayados con respecto a la totalidad de pilotes, es decir, variables como la uniformidad del suelo, la cantidad de ensayos ejecutados, el proceso de hincado y otros. La información obtenida en la presente investigación resulta en las Ecuaciones 5.1 y 5.2 que indicarían un factor para un promedio internacional de 2.06 y un factor en los casos estudiados en Perú de 2.42; en el caso de realizar un consolidado de toda la data presente, el factor de seguridad tendería al valor de 2.06 debido a la poca información que se cuenta en nuestro país. La normativa mostrada en la Tabla 2.1 indica factores de 2.25 (AASHTO), 1.9 a 2.1 (PDCA), 2.0 (IBC) & 2.0 a 2.4 (ASCE). Por lo antes mencionado se podría proponer un valor 2.25 como factor de seguridad para el Perú con respecto a cargas obtenidas del método ASD para una cantidad de ensayos que guardan una relación de una PCE por tres PDA.

#### 5.4 IMPACTO EN RESULTADOS DE PDA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE REPOSO PARA SUELO COHESIVO (CASO I).

Para la realización de esta evaluación se han considerado los PDA ejecutados en el Caso I (Iquitos). A continuación se presenta el agrupamiento realizado de la información indicada anteriormente en el Capítulo IV Ítem 4.1.5:

- Pilotes Ensayados durante la Instalación: Considerados los instrumentados durante el hincado de instalación y en rehincados menores a 7 días.

Tabla 5.3: Resumen de Resultados de Carga Última de Pilotes Ensayados durante la instalación para Caso I (Ver Figura 4.5)

PDA (ton)	PROMEDIO (ton)	Coficiente de Variación
87	102.5	0.129
90		
92		
95		
100		
103		
105		
105		
118		
130		

- Pilotes Ensayados en Rehinca: Considerados los instrumentados posteriores a los 7 días de su instalación.

Tabla 5.4: Resumen de Resultados de Carga Última de Pilotes Ensayados en Rehinca para Caso I (Ver Figura 4.6)

<b>PDA (ton)</b>	<b>PROMEDIO (ton)</b>	<b>Coefficiente de Variación</b>
105	96	0.069
100		
95		
92		
88		

La variación entre los resultados de Capacidad de Carga de Falla disminuye en 53% con el reposo del suelo para el caso de Pruebas de Carga Dinámica, esta diferencia también se puede ver en el comportamiento de las curvas esfuerzo-deformación mostrados en las Figuras 4.5 & 4.6.

Por otro lado, se puede indicar que los pilotes ensayados durante el hincado tiene una capacidad última mayor en 107% respecto a los ensayados posterior a un periodo de reposo, esto establece la ocurrencia del fenómeno denominado “relajación” debido a que el suelo muestra un mayor ratio carga/penetración con respecto al que desarrolla posteriormente a una etapa de reposo o en estado de operación. Este efecto respalda la realización de ensayos de carga durante el hincado y en rehinca para realizar una calibración de valores de ratios de instalación de pilotes.

## **5.5 ESFUERZOS DINÁMICOS Y ESTÁTICOS EN ENSAYOS DE CARGA**

Para el caso de PCE, el esfuerzo estático aplicado al pilote es obtenido directamente mediante un manómetro. Por otro lado, los esfuerzos aplicados mediante impacto en el PDA son medidos por deformómetros instalados en el pilote, esta lectura correspondería a la carga total aplicada que comprendería un aspecto estático y otro dinámico; posteriormente mediante el análisis de los desplazamientos y aceleraciones por la teoría de la ecuación de onda se obtiene los esfuerzos estáticos equivalentes al PCE.

En las tablas a continuación se muestra las cargas y los desplazamientos obtenidos por PDA tanto por los métodos CAPWAP y CASE respectivamente. Es claro que no es una relación directa entre los diferenciales de cargas y asentamientos debido a que no se está considerando en el presente análisis el factor del comportamiento de la velocidad de la onda.

Tabla 5.5: Valores de Carga y Desplazamiento obtenido de PDA (CAPWAP / CASE) para Caso I (Iquitos)

Identificación del Pilote	Desplazamiento Total DMX (mm)	Asentamiento Permanente Observado (mm)	Capacidad Total (CAPWAP) (ton)	Carga Máxima Aplicada (CASE) (ton)	Diferencia (ton)
008-ENG HALL-MOTOR	9.06	0.88	108	124	16.0
028-ENGINE HALL	9.13	1.05	101.3	109	7.7
022-STACK	10.3	1	120	127	7.0
024-STACK	11.37	2.27	113.8	128	14.2
083-ENGINE HALL	10.12	0.64	121	130	9.0
077-ENGINE HALL	9.46	0.63	106.9	152	45.1
065-ENGINE HALL - MOTORES	8.4	1.06	112.1	146	33.9
066-ENGINE HALL - MOTORES	9.79	1.79	95.8	120	24.2
PP1-ENGINE HALL - MOTORES	9.29	0.81	106	183	77.0
05-TANQUES	6.1	1.83	130	137	7.0
<b>PROMEDIO</b>	<b>9.302</b>	<b>1.196</b>	<b>111.49</b>	<b>135.6</b>	<b>24.11</b>

Tabla 5.6: Valores de Carga y Desplazamiento obtenido de PDA (CAPWAP / CASE) para Caso III (Chimbote)

Identificación del Pilote	Desplazamiento Total DMX (mm)	Asentamiento Permanente Observado (mm)	Capacidad Total (CAPWAP) (ton)	Carga Máxima Aplicada (CASE) (ton)	Diferencia (ton)
P9-002-C5 BLOQUE A1	11.44	1.38	376.6	481.3	104.7
P9-003-C5 BLOQUE A1	11.35	1.59	326.3	359.1	32.8
P9-004-C3 BLOQUE A1	12.92	3.85	343.7	435.3	91.63
<b>PROMEDIO</b>	<b>11.90</b>	<b>2.27</b>	<b>348.87</b>	<b>425.24</b>	<b>76.38</b>

De estos valores se aprecia que la carga dinámica correspondería a un 18% de la carga total encontrada y un 82% que correspondería a la carga estática para un asentamiento permanente promedio igual al 16% del desplazamiento máximo obtenido en el ensayo.

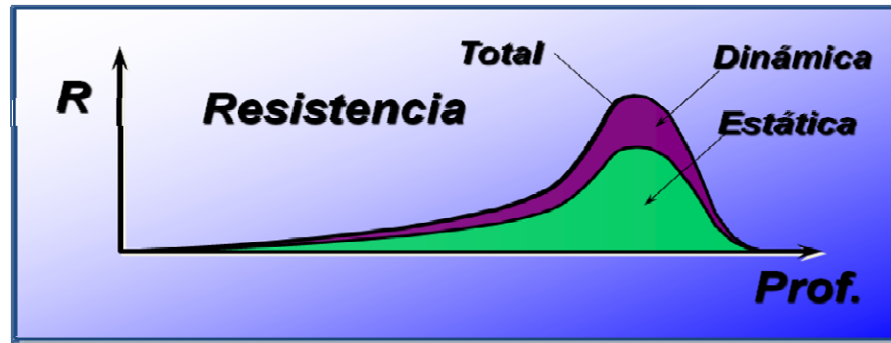


Figura 5.11: Esquema del aporte Dinámico y Estático en la Carga Total Aplicada durante un PDA

### 5.6 COMPARATIVO DE CAPACIDADES DE CARGA ÚLTIMA DE ENSAYOS Y CAPACIDAD DE CARGAS REQUERIDAS POR CADA PROYECTO.

Como se indico en capítulos anteriores, la Capacidad de Carga Última, en la presente investigación, es obtenida de las curvas Carga vs. Desplazamiento Estático obtenidas de los ensayos de carga PCE y PDA mediante el Método de Davisson. Por otro lado, la Capacidad Requerida por cada proyecto es determinada mediante métodos analíticos y/o semi-empíricos de datos obtenidos de ensayos de laboratorio.

Tabla 5.7: Relación de la Capacidad Admisible Requerida y la Capacidad de Carga Última obtenida de PCE y PDA.

Identificación del Pilote	Capacidad Última por PCE (ton)	Capacidad Última por PDA (ton)	Capacidad Admisible Requerida por el Proyecto (ton)
CASO I: QUITOS	118.50	96.00	40.00
CASO II: RIOJA	343.00	-	120.00
CASO III: CHIMBOTE	370.00	313.33	70.00

Para el Caso I, se tiene un valor promedio de 2.68 entre Capacidad Última de Ensayos PCE y PDA con respecto a la Capacidad Admisible Requerida.

Para el Caso II, se tiene un valor promedio de 2.86 entre Capacidad Última de Ensayos PCE con respecto a la Capacidad Admisible Requerida. En esta oportunidad no se considera los valores obtenidos de PDA debido a que las cargas aplicadas son menores para alcanzar resultados óptimos o de correlación.

Para el Caso III, se tiene un valor promedio de 4.88 entre Capacidad Última de Ensayos PCE y PDA con respecto a la Capacidad Admisible Requerida.

De los ratios obtenidos se puede establecer que los cálculos realizados durante la elaboración de los expedientes técnicos de cada proyecto se puede optimizar antes o durante la ejecución del proyecto con los resultados de pruebas de carga tanto PCE ó PDA. Considerando que el Factor de Seguridad fuera 2.5 en todos los proyectos se podría mejorar la ingeniería del diseño de los pilotes en un promedio de 1.34, 1.43 y 2.44 veces lo originalmente propuesto respectivamente en cada caso.

## **5.7 CAPACIDAD DE CARGA DE PILOTES MEDIANTE ENSAYOS DE CARGA PARA CASOS DE PÉRDIDA DE APORTE POR FRICCIÓN**

La presente investigación no tiene por objetivo realizar estudios de los fenómenos de licuación o socavación que son los más comunes en la ejecución de pilotes y afectan el aporte por fricción del pilote, es por ello, que para fines de análisis de la presente sección se resumirá su impacto de estos fenómenos como la eliminación del aporte por fricción en la longitud o potencial de actuación de estos.

Coduto, D. (2001) indica que el desplazamiento máximo para vencer el aporte por fricción del suelo está entre 5mm a 10mm. Por otro lado, mucho más desplazamiento es requerido para movilizar la capacidad máxima por punta. Lo que el autor concluye es que la carga de trabajo de los pilotes está soportada por la capacidad a fricción del mismo.

De los casos estudiados, donde se presenta el fenómeno de licuación es en el Caso III, en este suelo existe un potencial de licuación hasta los 7 u 8 metros de profundidad. Con los resultados de PCE se estiman valores promedio de Capacidad Última de 370 ton con una longitud de pilote empotrada de 5m. De esto se infiere que los altos valores obtenidos de PCE se perderán con la ocurrencia de la licuación.

Por otro lado, en el caso de PDA de pilotes más profundos se puede restar la capacidad por aporte de fricción de la zona licuable (Considerando 7m de licuación desde el nivel de terreno)

Tabla 5.8: Aporte por Fricción y por Punta de Resultados de PDA para Caso III.

Descripción del Pilote	Profundidad (m)	Aporte por Fricción (ton)	Aporte por Punta (ton)
P09-002-C5	1.2	17.2	
	2.2	12.5	
	3.3	8.5	
	4.3	15.9	
	5.4	36	
	6.4	54	
	7.4	60.6	
P09-003-C5	0.9	7.5	
	1.9	5.3	
	3	5	
	4	12	
	5	25.8	
	6.1	37.4	
	7.1	41.6	
P09-004-C3	0.3	44.4	
	1.4	49.9	
	2.5	49.9	
	3.7	32	
	4.8	5	
	5.9	0	
	7	0	

De estos resultados mostrados en la tabla anterior se puede indicar que la Capacidad de Carga Promedio al restar el aporte por fricción sería 209.3 ton, en relación con la Capacidad Requerida se establecería un valor de 2.99.

Por lo antes expuesto, la PCE no brinda información que se pueda utilizar cuantitativamente para toma de decisión cuando existen fenómenos que afectan el aporte por fricción. Adicionalmente con lo indicado por Coduto D. (2001), el resultado de PCE podría corresponder a solo aporte por fricción, por lo que significaría un falso resultado cuando se pierda este aporte por la ocurrencia de una de las anomalías del suelo antes mencionadas.

En el caso de PDA se puede realizar un estimado del comportamiento de cualquiera de estos fenómenos restando el aporte de los resultados que muestra este ensayo.



## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES

Mediante los resultados de los casos estudiados, se ha establecido una relación entre los resultados de los ensayos de carga estáticos y dinámicos. Para tal efecto se ha utilizado la curva de comportamiento Esfuerzo-Desplazamiento como marco comparativo y el Método de Davisson, éste es el más conservador y más utilizado en el país.

La relación de resultados de Capacidad de Carga Última, o de Falla, utilizando el Método de Davisson entre Pruebas de Carga Dinámica (PDA) y Pruebas de Carga Estática (PCE) de los casos estudiados tienen poca variabilidad, mostrando un resultado de capacidades de PDA con un rango entre 15% y 19% menores que los PCE, teniendo en cuenta que la data utilizada tiene un coeficiente de variación del  $\pm 11\%$ . Realizando un promedio ponderado en función de la cantidad de ensayos de PDA y PCE utilizados se diría que los valores obtenidos de PDA tienen una relación del 0.8265 en relación al PCE con un coeficiente de variación promedio ponderado de  $\pm 10\%$ .

La PDA brinda mayor información del comportamiento de los esfuerzos aplicados y la interacción suelo-pilote respecto a los resultados que se obtienen de una PCE. Los principales valores medidos por la PDA son los esfuerzos a compresión y tracción aplicados, la capacidad por aporte por fricción del pilote por tramos, la detección de daños en la sección del pilote y eficiencia del martillo de hincado.

Existen entidades internacionales que incorporan en sus manuales o normativa la utilización de PDA como un método fiable para la obtención de resultados de capacidad de la interacción suelo-pilote, siendo estas la PDCA, AASHTO, ASCE,

---

IBC, La Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelos-España, Dirección General de Reglamentos y Sistemas-Rep. Dominicana, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, entre otras.

Para Capacidades de Carga Última, o de Falla, según el Método de Davisson, las investigaciones internacionales muestran que los resultados de PDA tienen un rango de valores menores de entre 7% y 17% con respecto a los PCE, teniendo en cuenta que la data utilizada por esas investigaciones es hasta 25 veces mayor en cantidad que la manejada en el presente documento y el coeficiente de variación promedio entre la data utilizada sería de  $\pm 16.5\%$ . Realizando un promedio ponderado en función de la cantidad de muestras utilizada se diría que los resultados de PDA tienen una relación de valores de 0.9616 respecto a los PCE con un coeficiente de variación promedio ponderado de  $\pm 16.01\%$ . Por otro lado existen datos de resultados que indican que la relación de PDA/PCE es 1.010 y el coeficiente de variación de  $\pm 16.8\%$ . De realizarse un promedio ponderado total de estos datos se encontraría una relación PDA/PCE igual a 0.975 y un coeficiente de variación de  $\pm 16.23\%$ .

Se puede evidenciar que para suelo cohesivo (Caso I & II), los asentamientos permanentes son más altos para PCE, donde la carga es aplicada lentamente (estáticamente) por un periodo de 24 horas, con respecto a las PDA donde la carga es aplicada instantáneamente (dinámica). Por otro lado, las PDA en suelos no cohesivos (Caso III) muestran un asentamiento permanente similar al PCE. Estos valores encontrados no indican que existe diferencia en los desplazamientos permanentes entre tipos de ensayos cuando se ejecuta en suelos cohesivos, se podría inferir que el causal de este comportamiento en suelos cohesivos se deba a la generación del incremento de presión de poros (Condiciones No Drenadas) que se genera en cortos plazos durante la aplicación de una carga rápida como es en el PDA, dicha presión se disipa con el tiempo (Condiciones Drenadas) con aplicación de cargas a largo plazo como se podría interpretar el PCE.

En el comportamiento Carga vs. Desplazamiento obtenido de pruebas de carga se identifica las tendencias para los casos de suelos cohesivos blandos a duros (Caso

I) y no cohesivos o cohesivos muy duros (Caso II y III). Donde los suelos cohesivos blandos a duros muestran una tendencia inclinada y constante con menor aumento de carga y desplazamiento que los suelos no cohesivos o cohesivos muy duros.

La información obtenida de las relaciones entre los resultados de Capacidad de Carga Última o Falla entre PDA/PCE indicarían un factor para un promedio internacional de 2.06 y un factor en los casos estudiados en Perú de 2.42; en el caso de realizar un consolidado de toda la información presente, el factor de seguridad tendería al valor de 2.06 debido a la poca información que se cuenta en nuestro país. La normativa mostrada en el Capítulo II, establece factores de 2.25 (AASHTO), 1.9 a 2.1 (PDCA), 2.0 (IBC) & 2.0 a 2.4 (ASCE). Por lo antes mencionado se podría proponer un valor 2.25 como factor de seguridad para el Perú con respecto a cargas obtenidas del método ASD para una cantidad de ensayos que guardan una relación de un (01) PCE (1 ó 2% del total de pilotes del proyecto) por tres (03) PDA (3 ó 6% del total de pilotes del proyecto).

Los pilotes ensayados durante el hincado tiene una capacidad última mayor en 107% respecto a los ensayados posterior a un periodo de reposo, esto establece la ocurrencia del fenómeno denominado “relajación” debido a que el suelo muestra un mayor ratio carga/penetración con respecto al que desarrolla posteriormente a una etapa de reposo o en estado de operación. Este efecto respalda la realización de ensayos de carga durante el hincado y en rehincado para realizar una calibración de valores de ratios de instalación de pilotes.

Con un periodo de reposo del pilote posterior al hincado, la variación o dispersión entre los resultados de Capacidad de Carga de Falla disminuye en 53% para el caso de Pruebas de Carga Dinámica, esta diferencia también se puede ver en el comportamiento de las curvas esfuerzo-deformación mostrado en el Capítulo IV.

De la información obtenida de la PDA, se puede indicar para este tipo de ensayos que la carga dinámica correspondería a un 18% de la Carga Total Aplicada en la prueba y el resto 82% correspondería a la carga estática equivalente a PCE para un asentamiento permanente promedio igual al 16% del desplazamiento máximo

obtenido en los casos I y III de la presente investigación. Por consiguiente, la PDA aplica mayor energía al pilote durante la instrumentación que el PCE brindando una mayor exposición del comportamiento del pilote.

El factor entre las Capacidades de Carga Última estimadas por PCE ó PDA con respecto a la Capacidad Admisible requerida de cada proyecto establece que los cálculos realizados durante la elaboración de los expedientes técnicos se puede optimizar antes o durante la ejecución del proyecto con los resultados de pruebas de carga sin importar el tipo de éstas. Considerando que el Factor de Seguridad para cualquiera del tipo de las pruebas de carga fuera 2.5 en todos los proyectos se podría mejorar la ingeniería del diseño de los pilotes en un promedio de 1.34, 1.43 y 2.44 veces lo originalmente propuesto respectivamente en cada caso sin considerar efectos que alteren el aporte por fricción de la interacción suelo-pilote.

La PCE no brinda información que se pueda utilizar cuantitativamente para toma de decisión cuando existen fenómenos que afectan el aporte por fricción. Adicionalmente, con lo indicado por Coduto D. (2001), el resultado de PCE podría corresponder a sólo aporte por fricción, por lo que significaría un falso resultado cuando se pierda este aporte por la ocurrencia de una anomalía del suelo (licuación, socavación u otro). Por otro lado, el PDA puede realizar un estimado del comportamiento de cualquiera de estos fenómenos restando el aporte por fricción de los estratos afectados por dichos fenómenos.

El Caso II, verificando con un PCE se demuestra que la ejecución de una PDA con valores de energía menores para obtener los estimados de carga última darán resultados menores por consiguiente conservadores respecto al comportamiento real de dicho pilote.

## 6.2 RECOMENDACIONES

Continuar investigando y aumentando la información de ensayos tanto PCE como PDA para un mismo proyecto y tipo de pilote para seguir mejorando las correlaciones entre instrumentaciones.

Profundizar en investigaciones referentes en el efecto de fenómenos de suelo como la licuación y los resultados de PDA respecto a la obtención de la Capacidad de Carga Suelo-Pilote bajo ocurrencia de eventos extremos.

Realizar investigaciones con objetivos similares dirigido a Pilotes Vaciados o Fundidos In Situ o del tipo Reemplazantes.

Es recomendable actualizar la normativa peruana incluyendo herramientas como el PDA para ampliar la muestra ensayada en un proyecto y mejorar la información del comportamiento del pilote.

Realizar ensayos de control PCE ó PDA para pilotes en suelos cohesivos considerando periodos de reposo mayores a 7 días, idealmente entre 20 a 30 días de instalados.

Antes de utilizar un factor de seguridad, identificar el procedimiento de cálculo estructural utilizado en la superestructura para establecer las cargas aplicadas a los pilotes (Método ASD ó LRFD)

No es adecuado realizar PCE en pilotes que tendrán un aporte ficticio de suelo durante la instrumentación con respecto a un evento extremo (sismo, crecida de río u otro).

Establecer como buena práctica, la mejora de la ingeniería de los pilotes en base a ensayos antes o durante la etapa de ejecución de los proyectos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), **AASHTO LRFD Bridge Design Specifications**, EUA, 2010.
- Alva J., **Diseño y Verificación de Carga Axial de Pilotes**. Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Lima, Perú, 1994.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **Norma Brasileira 6122 – Proyecto y Ejecución de Cimentaciones**, Brasil, 2010.
- Bermúdez, J., **Análisis Bidimensional Estático de Pilotes Individuales utilizando Datos de Prueba de Carga**, Tesis de Grado de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 1991.
- Bowles, J., **Foundation Analysis and Design**. 5ta Edición, Mc Graw-Hill Companies, EUA, 1997.
- Clough R.W.; Penzien, **Dynamics of Structures**, Mc Grawhill, Inc., 1975.
- Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes, **Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)**, Colombia, 2010.
- Coduto, D., **Foundation Design: Principles and Practices**. 2da Edición, Prentice Hall, EUA, 2001.
- Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelos - Documento Básico – Cimientos (DGAVS-DB-C), **Código Técnico de Edificación (CTE)**, España, 2006.
- Dirección General de Reglamentos y Sistemas (DGRS), **Reglamento para Estudios Geotécnicos en Edificaciones R-024**, Republica Dominicana, 2006.
- European Committee for Standardization (CEN), **European Standard EN 1997-1:2004**, Technical Committee CEN/TC250 “Structural Eurocodes”, 2004.

- 
- Flores J., **Determinación y Monitoreo de la Capacidad de Carga de Pilotes Mediante Ensayos No Destructivos**, Ponencia Congreso Internacional de Hidráulica y Geotecnia, Instituto de Construcción y Gerencia- ICG, Lima, Perú, 2013.
  - Federal Highway Administration U.S. (FHWA), **Design and Construction of Driven Pile Foundations - Workshop Manual**. National Highway Institute. EUA, 1998.
  - Lara J., **Análisis de la Dinámica de Hincado de Pilotes por Medio de la Teoría de Propagación de onda Unidimensional**, Tesis de Grado de Ingeniero Civil, Universidad Nacional Federico Villareal, Lima, Perú, 2007.
  - Likins G., **The 2010 AASHTO LRFD Resistance Factors**, Pile Driver Magazine, pp. 43-51, EUA, 2010.
  - Likins G., **Correlation of CAPWAP with Static Load Test**, 7th International Conference on the Application of Stresswave Theory to Piles, Malasia, 2004.
  - Likins G., **Safety Factors for Pile Testing**, Pile Driver, Vol.4, No.2, pp. 34-43 Spring, EUA, 2003.
  - Lujan E., **Evaluación de la Capacidad de Carga Dinámica de Pilotes usando la Ecuación de Onda**, Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2010.
  - Lujan E., **Evaluación de la Capacidad de Carga Dinámica de Pilotes usando la Ecuación de Onda**, Ponencia en XIV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros Departamental de Loreto, Iquitos, Perú, 2003.
  - Miranda, J., **Análisis Estático y Dinámico de Cimentaciones Piloteadas Prefabricadas: interacción del sistema suelo-pilote-martinete**, Tesis de Grado de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2002.
  - Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), **Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)**, Perú, 2006.
  - Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), **Norma Técnica de Edificación E.050 SUELOS Y CIMENTACIONES**, Perú, 2006.

- 
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), **Manual de Diseño de Puentes**, Perú, 2003.
  - Peña, M., **Análisis Estático y Dinámico entre el Suelo y Cimentaciones Superficiales y Piloteadas**, Tesis de Grado Ing. Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 1988.
  - Prakash S. & Sharma H., **Pile Foundations in Engineering Practice**. Wiley Interscience publication, EUA, 1990.
  - Restrepo, V., **Implementación de una Solución Analítica para el Fenómeno de Propagación Unidimensional de Ondas en Pilotes y su Adaptación para la Interpretación de Resultados de la Prueba de Integridad de Pilotes (PIT)**, Tesis de Grado Ing. Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2005.
  - Ruiz, V., **Diseño de Cimentaciones Piloteadas**, Tesis de Grado de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 1997.
  - Simons, H.A., **A theoretical study of Pile Driving**, Tesis de Doctorado Universidad de Cambridge, EEUU, 1985.
  - Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS), **Manual de Cimentaciones Profundas**, México, 2001.
  - US Army Corps of Engineers, **Design of Pile Foundations**, Engineer Manual Nro. 1110-2-2906, Department of the Army, USA, (1991)
  - The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, **Foundation Design and Construction**, Geotechnical Engineering Office, 5° Ed., Hong Kong, 2006.
  - Tomlinson M., **Pile Design and Construction Practice**, 5ta Edición, Taylor&Francis, EEUU, 2008.



## ANEXO A

### Lecturas obtenidas en PCE- Compresión en Caso I (Iquitos)

Tabla A.1: Lecturas obtenidas en PCE- Compresión en Pilote PP1 Engine Hall Motor – Iquitos

CARGA (TON)	TIEMPO (min)	DIAL GAUGE-1 (mm) HZY 390	DIAL GAUGE-2 (mm) HZY 448	DIAL GAUGE-3 (mm) HZY 394	DEFORMACION (mm)			PROMEDIO (mm)	
<b>0</b>	0	32.35	36.05	44.10	0.00	0.00	0.00	0.00	
	<b>10.00</b>	0	32.10	35.35	44.10	0.25	0.70	0.00	0.32
		10	32.10	35.35	44.10	0.25	0.70	0.00	0.32
		20	32.10	35.35	44.10	0.25	0.70	0.00	0.32
		30	32.10	35.35	44.10	0.25	0.70	0.00	0.32
		40	32.10	35.35	44.10	0.25	0.70	0.00	0.32
		50	32.10	35.35	44.10	0.25	0.70	0.00	0.32
<b>20.00</b>	0	32.10	35.35	44.10	0.25	0.70	0.00	0.32	
	0	31.91	34.87	43.22	0.44	1.18	0.88	0.83	
	10	31.91	34.87	43.22	0.44	1.18	0.88	0.83	
	20	31.91	34.87	43.22	0.44	1.18	0.88	0.83	
	30	31.91	34.84	43.22	0.44	1.21	0.88	0.84	
	40	31.91	34.84	43.22	0.44	1.21	0.88	0.84	
	50	31.91	34.84	43.22	0.44	1.21	0.88	0.84	
<b>30.00</b>	0	31.91	34.84	43.22	0.44	1.21	0.88	0.84	
	0	31.64	34.26	42.96	0.71	1.79	1.14	1.21	
	10	31.62	34.26	42.96	0.73	1.79	1.14	1.22	
	20	31.62	34.26	42.96	0.73	1.79	1.14	1.22	
	30	31.62	34.22	42.96	0.73	1.83	1.14	1.23	
	40	31.62	34.22	42.96	0.73	1.83	1.14	1.23	
	50	31.62	34.22	42.96	0.73	1.83	1.14	1.23	
<b>40.00</b>	0	31.62	34.22	42.96	0.73	1.83	1.14	1.23	
	0	31.30	33.73	41.71	1.05	2.32	2.39	1.92	
	10	31.29	33.73	41.70	1.06	2.32	2.40	1.93	
	20	31.28	33.73	41.70	1.07	2.32	2.40	1.93	
	30	31.28	33.73	41.70	1.07	2.32	2.40	1.93	
	40	31.28	33.73	41.70	1.07	2.32	2.40	1.93	
	50	31.28	33.73	41.70	1.07	2.32	2.40	1.93	
<b>50.00</b>	0	31.28	33.73	41.70	1.07	2.32	2.40	1.93	
	0	30.94	33.22	41.33	1.41	2.83	2.77	2.34	
	10	30.90	33.20	41.33	1.45	2.85	2.77	2.36	
	20	30.90	33.19	41.33	1.45	2.86	2.77	2.36	
	30	30.90	33.19	41.33	1.45	2.86	2.77	2.36	

	40	30.90	33.19	41.33	1.45	2.86	2.77	2.36
	50	30.90	33.19	41.33	1.45	2.86	2.77	2.36
	60	30.90	33.19	41.33	1.45	2.86	2.77	2.36
<b>60.00</b>	0	30.08	32.30	40.22	2.27	3.75	3.88	3.30
	10	30.05	32.28	40.22	2.30	3.77	3.88	3.32
	20	30.04	32.27	40.22	2.31	3.78	3.88	3.32
	30	30.04	32.27	40.22	2.31	3.78	3.88	3.32
	40	30.04	32.27	40.22	2.31	3.78	3.88	3.32
	50	30.04	32.27	40.22	2.31	3.78	3.88	3.32
<b>70.00</b>	60	30.04	32.27	40.22	2.31	3.78	3.88	3.32
	0	29.12	31.15	38.94	3.23	4.90	5.16	4.43
	10	29.09	31.13	38.94	3.26	4.92	5.16	4.45
	20	29.08	31.13	38.94	3.27	4.92	5.16	4.45
	30	29.08	31.12	38.94	3.27	4.93	5.16	4.45
	40	29.08	31.12	38.94	3.27	4.93	5.16	4.45
	50	29.08	31.12	38.94	3.27	4.93	5.16	4.45
<b>80.00</b>	60	29.08	31.12	38.94	3.27	4.93	5.16	4.45
	0	28.33	30.35	37.92	4.02	5.70	6.18	5.30
	10	28.30	30.31	37.92	4.05	5.74	6.18	5.32
	20	28.29	30.30	37.92	4.06	5.75	6.18	5.33
	30	28.28	30.30	37.92	4.07	5.75	6.18	5.33
	40	28.28	30.30	37.92	4.07	5.75	6.18	5.33
	50	28.28	30.30	37.92	4.07	5.75	6.18	5.33
	60	28.28	30.30	37.92	4.07	5.75	6.18	5.33
<b>60.00</b>	720	28.03	29.97	37.37	4.32	6.08	6.73	5.71
<b>40.00</b>	0	28.24	30.17	37.40	4.11	5.88	6.70	5.56
<b>20.00</b>	0	28.98	30.94	37.86	3.37	5.11	6.24	4.91
<b>0</b>	0	29.60	31.41	37.86	2.75	4.64	6.24	4.54
<b>0</b>	0	30.40	31.41	37.86	1.95	4.64	6.24	4.28

Tabla A.2: Lecturas obtenidas en PCE- Compresión en Pilote PP2 STACK – Iquitos

CARGA (TON)	TIEMP O (min)	DIAL GAUGE-1 (mm)	DIAL GAUGE-2 (mm)	DIAL GAUGE-3 (mm)	DEFORMACION (mm)			PROMEDI O (mm)
		HZY 448	HZY 390	HZY 394				
<b>0</b>	0	41.07	39.73	23.13	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>10.00</b>	0	40.42	39.05	22.92	0.65	0.68	0.21	0.51
	10	40.42	39.05	22.92	0.65	0.68	0.21	0.51
	20	40.42	39.05	22.92	0.65	0.68	0.21	0.51
	30	40.42	39.05	22.92	0.65	0.68	0.21	0.51
	40	40.42	39.05	22.92	0.65	0.68	0.21	0.51
	50	40.42	39.05	22.92	0.65	0.68	0.21	0.51
<b>20.00</b>	60	40.42	39.05	22.92	0.65	0.68	0.21	0.51
	0	40.04	38.61	22.68	1.03	1.12	0.45	0.87
	10	40.01	38.61	22.65	1.06	1.12	0.48	0.89
	20	40.01	38.61	22.65	1.06	1.12	0.48	0.89
	30	40.00	38.61	22.63	1.07	1.12	0.50	0.90
	40	40.00	38.61	22.63	1.07	1.12	0.50	0.90

	50	40.00	38.61	22.63	1.07	1.12	0.50	0.90
	60	40.00	38.61	22.63	1.07	1.12	0.50	0.90
<b>30.00</b>	0	39.56	38.09	22.29	1.51	1.64	0.84	1.33
	10	39.54	38.08	22.25	1.53	1.65	0.88	1.35
	20	39.51	38.06	22.23	1.56	1.67	0.90	1.38
	30	39.45	37.98	22.16	1.62	1.75	0.97	1.45
	40	39.40	37.91	22.10	1.67	1.82	1.03	1.51
	50	39.40	37.91	22.09	1.67	1.82	1.04	1.51
	60	39.40	37.91	22.09	1.67	1.82	1.04	1.51
<b>40.00</b>	0	38.98	37.33	21.48	2.09	2.40	1.65	2.05
	10	38.97	37.32	21.45	2.10	2.41	1.68	2.06
	20	38.95	37.32	21.44	2.12	2.41	1.69	2.07
	30	38.95	37.32	21.43	2.12	2.41	1.70	2.08
	40	38.94	37.31	21.42	2.13	2.42	1.71	2.09
	50	38.94	37.31	21.42	2.13	2.42	1.71	2.09
	60	38.94	37.31	21.42	2.13	2.42	1.71	2.09
<b>50.00</b>	0	38.47	36.76	20.73	2.60	2.97	2.40	2.66
	10	38.43	36.73	20.69	2.64	3.00	2.44	2.69
	20	38.43	36.72	20.68	2.64	3.01	2.45	2.70
	30	38.43	36.72	20.67	2.64	3.01	2.46	2.70
	40	38.43	36.72	20.67	2.64	3.01	2.46	2.70
	50	38.43	36.72	20.67	2.64	3.01	2.46	2.70
	60	38.43	36.72	20.67	2.64	3.01	2.46	2.70
<b>60.00</b>	0	37.90	36.21	20.09	3.17	3.52	3.04	3.24
	10	37.85	36.18	20.04	3.22	3.55	3.09	3.29
	20	37.85	36.18	20.03	3.22	3.55	3.10	3.29
	30	37.85	36.18	20.03	3.22	3.55	3.10	3.29
	40	37.85	36.18	20.03	3.22	3.55	3.10	3.29
	50	37.85	36.18	20.03	3.22	3.55	3.10	3.29
	60	37.85	36.18	20.03	3.22	3.55	3.10	3.29
<b>70.00</b>	0	37.42	35.74	19.66	3.65	3.99	3.47	3.70
	10	37.36	35.70	19.61	3.71	4.03	3.52	3.75
	20	37.36	35.69	19.59	3.71	4.04	3.54	3.76
	30	37.36	35.69	19.59	3.71	4.04	3.54	3.76
	40	37.35	35.66	19.58	3.72	4.07	3.55	3.78
	50	37.34	35.66	19.58	3.73	4.07	3.55	3.78
	60	37.34	35.66	19.58	3.73	4.07	3.55	3.78
<b>80.00</b>	0	36.59	34.98	18.98	4.48	4.75	4.15	4.46
	10	36.52	34.95	18.91	4.55	4.78	4.22	4.52
	20	36.51	34.95	18.90	4.56	4.78	4.23	4.52
	30	36.51	34.95	18.90	4.56	4.78	4.23	4.52
	40	36.51	34.95	18.90	4.56	4.78	4.23	4.52
	50	36.51	34.95	18.90	4.56	4.78	4.23	4.52
	60	36.51	34.95	18.90	4.56	4.78	4.23	4.52
	720	36.28	34.72	18.74	4.79	5.01	4.39	4.73
<b>60.00</b>	0	36.28	34.76	18.75	4.79	4.97	4.38	4.71
<b>40.00</b>	0	36.28	34.76	18.76	4.79	4.97	4.37	4.71
<b>20.00</b>	0	36.28	34.76	18.76	4.79	4.97	4.37	4.71
<b>0</b>	0	36.28	34.73	18.76	4.79	5.00	4.37	4.72

## ANEXO B

### Lecturas obtenidas en PCE- Compresión en Caso II (Rioja)

Tabla B.1: Lecturas obtenidas en PCE- Compresión en Pilote P85 Silos – Rioja

CARGA (TON)	TIEMPO (min)	DIAL GAUGE-1 (mm)	DIAL GAUGE-2 (mm)	DIAL GAUGE-3 (mm)	DEFORMACION (mm)			PROMEDIO (mm)
<b>Inicio de la prueba de compresión del pilote</b>								
<b>0</b>		26.69	44.61	30.35	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>27.5</b>	10:00	25.62	42.43	26.42	1.07	2.18	3.93	2.39
		25.46	42.33	26.41	1.23	2.28	3.94	2.48
<b>55.0</b>	10:15	24.54	41.33	26.40	2.15	3.28	3.95	3.13
		24.40	41.27	24.34	2.29	3.34	6.01	3.88
		24.29	41.24	24.28	2.40	3.37	6.07	3.95
		24.26	41.23	24.27	2.43	3.38	6.08	3.96
<b>82.5</b>	10:50	23.20	40.20	22.78	3.49	4.41	7.57	5.16
		23.08	40.08	22.65	3.61	4.53	7.70	5.28
		22.98	40.01	22.60	3.71	4.60	7.75	5.35
		22.86	39.93	22.49	3.83	4.68	7.86	5.46
		22.83	39.90	22.45	3.86	4.71	7.90	5.49
<b>110.0</b>	11:50	21.92	38.77	21.34	4.77	5.84	9.01	6.54
		21.80	38.66	21.25	4.89	5.95	9.10	6.65
		21.74	38.60	21.20	4.95	6.01	9.15	6.70
		21.70	38.57	21.14	4.99	6.04	9.21	6.75
<b>137.5</b>	12:30	20.38	36.96	19.91	6.31	7.65	10.44	8.13
		20.30	36.79	19.80	6.39	7.82	10.55	8.25
		20.14	36.74	19.78	6.55	7.87	10.57	8.33
		20.07	36.68	19.74	6.55	7.93	10.57	8.35
<b>165.0</b>	13:10	18.80	35.03	18.74	7.82	9.58	11.57	9.66
		18.67	34.90	18.66	7.95	9.71	11.65	9.77
		18.59	34.84	18.65	8.03	9.77	11.66	9.82
		18.52	34.78	18.61	8.10	9.83	11.70	9.88
<b>192.5</b>	13:55	17.28	33.11	17.67	9.34	11.50	12.64	11.16
		17.05	32.90	17.61	9.57	11.71	12.70	11.33
		16.94	32.83	17.58	9.68	11.78	12.73	11.40
		16.90	32.80	17.58	9.72	11.81	12.73	11.42
<b>220</b>	14:45	15.16	30.27	16.59	11.46	14.34	13.72	13.17

<b>0</b>	08:30	15.16	29.48	16.34	11.46	15.13	13.97	13.52
		14.95	29.38	16.32	11.67	15.23	13.99	13.63
		14.79	29.14	16.28	11.83	15.47	14.03	13.78
		14.42	28.93	16.11	12.20	15.68	14.20	14.03
		13.90	28.40	15.81	12.72	16.21	14.50	14.48
		13.73	28.37	15.78	12.89	16.24	14.53	14.55
		13.74	28.37	15.78	12.88	16.24	14.53	14.55

Tabla B.2: Lecturas obtenidas en PCE- Compresión en Pilote P49 HVC Nro.4 – Rioja

CARGA (TON)	TIEMPO (min)	DIAL GAUGE-1 (mm)	DIAL GAUGE-2 (mm)	DIAL GAUGE-3 (mm)	DEFORMACION (mm)			PROMEDIO (mm)
<b>Inicio de la prueba de compresión del pilote</b>								
<b>0</b>		41.74	27.93	39.59	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>30.0</b>	18:45	40.55	27.61	39.37	1.19	0.32	0.22	0.58
		40.54	27.59	39.36	1.20	0.34	0.23	0.59
		40.53	27.58	39.34	1.21	0.35	0.25	0.60
<b>60.0</b>	19:15	39.86	26.48	38.49	1.88	1.45	1.10	1.48
		39.84	26.44	38.45	1.90	1.49	1.14	1.51
		39.83	26.43	38.44	1.91	1.50	1.15	1.52
<b>90.0</b>	19:55	39.10	25.19	37.36	2.64	2.74	2.23	2.54
		39.06	25.12	37.31	2.68	2.81	2.28	2.59
		39.05	25.11	37.29	2.69	2.82	2.30	2.60
<b>120.0</b>	20:45	39.04	25.10	37.28	2.70	2.83	2.31	2.61
		38.27	23.80	36.05	3.47	4.13	3.54	3.71
		38.23	23.74	35.98	3.51	4.19	3.61	3.77
<b>150.0</b>	21:15	38.21	23.73	35.96	3.53	4.20	3.63	3.79
		38.20	23.72	35.95	3.54	4.21	3.64	3.80
		37.21	22.22	34.40	4.53	5.71	5.19	5.14
<b>180.0</b>	21:45	37.16	22.14	34.30	4.58	5.79	5.29	5.22
		37.14	22.12	34.28	4.60	5.81	5.31	5.24
		37.13	22.11	34.28	4.61	5.82	5.31	5.25
<b>210.0</b>	22:15	35.91	20.61	32.46	5.83	7.32	7.13	6.76
		35.88	20.52	32.31	5.86	7.41	7.28	6.85
		35.88	20.50	32.28	5.86	7.43	7.31	6.87
<b>240</b>	22:30	35.64	19.70	31.96	6.10	8.23	7.63	7.32
		35.61	19.65	31.90	6.13	8.28	7.69	7.37
		35.59	19.63	31.88	6.15	8.30	7.71	7.39
<b>240</b>	22:30	35.57	19.62	31.87	6.17	8.31	7.72	7.40
		35.35	18.64	31.45	6.39	9.29	8.14	7.94
		35.30	18.61	31.42	6.44	9.32	8.17	7.98

		35.26	18.59	31.41	6.48	9.34	8.18	8.00
	10:30	34.82	16.26	30.60	6.92	11.67	8.99	9.19
<b>180</b>		34.83	16.26	30.61	6.91	11.67	8.98	9.19
<b>120</b>		34.83	16.26	30.61	6.91	11.67	8.98	9.19
<b>60</b>		34.84	16.26	30.62	6.90	11.67	8.97	9.18
<b>0</b>	11:00	34.84	16.26	30.62	6.90	11.67	8.97	9.18

Tabla B.3: Lecturas obtenidas en PCE- Compresión en Pilote Z12-P29 Secador Nro.2 – Rioja

CARGA (TON)	TIEMPO (min)	DIAL GAUGE-1 (mm)	DIAL GAUGE-2 (mm)	DIAL GAUGE-3 (mm)	DEFORMACION (mm)			PROMEDIO (mm)
<b>Inicio de la prueba de compresión del pilote</b>								
<b>0</b>		41.74	27.93	39.59	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>30.0</b>	18:45	40.55	27.61	39.37	1.19	0.32	0.22	0.58
		40.54	27.59	39.36	1.20	0.34	0.23	0.59
		40.53	27.58	39.34	1.21	0.35	0.25	0.60
<b>60.0</b>	19:15	39.86	26.48	38.49	1.88	1.45	1.10	1.48
		39.84	26.44	38.45	1.90	1.49	1.14	1.51
		39.83	26.43	38.44	1.91	1.50	1.15	1.52
<b>90.0</b>	19:55	39.10	25.19	37.36	2.64	2.74	2.23	2.54
		39.06	25.12	37.31	2.68	2.81	2.28	2.59
		39.05	25.11	37.29	2.69	2.82	2.30	2.60
		39.04	25.10	37.28	2.70	2.83	2.31	2.61
<b>120.0</b>	20:45	38.27	23.80	36.05	3.47	4.13	3.54	3.71
		38.23	23.74	35.98	3.51	4.19	3.61	3.77
		38.21	23.73	35.96	3.53	4.20	3.63	3.79
		38.20	23.72	35.95	3.54	4.21	3.64	3.80
<b>150.0</b>	21:15	37.21	22.22	34.40	4.53	5.71	5.19	5.14
		37.16	22.14	34.30	4.58	5.79	5.29	5.22
		37.14	22.12	34.28	4.60	5.81	5.31	5.24
		37.13	22.11	34.28	4.61	5.82	5.31	5.25
<b>180.0</b>	21:45	35.91	20.61	32.46	5.83	7.32	7.13	6.76
		35.88	20.52	32.31	5.86	7.41	7.28	6.85
		35.88	20.50	32.28	5.86	7.43	7.31	6.87
<b>210.0</b>	22:15	35.64	19.70	31.96	6.10	8.23	7.63	7.32
		35.61	19.65	31.90	6.13	8.28	7.69	7.37
		35.59	19.63	31.88	6.15	8.30	7.71	7.39
		35.57	19.62	31.87	6.17	8.31	7.72	7.40
<b>240</b>	22:30	35.35	18.64	31.45	6.39	9.29	8.14	7.94
		35.30	18.61	31.42	6.44	9.32	8.17	7.98

		35.26	18.59	31.41	6.48	9.34	8.18	8.00
	10:30	34.82	16.26	30.60	6.92	11.67	8.99	9.19
<b>180</b>		34.83	16.26	30.61	6.91	11.67	8.98	9.19
<b>120</b>		34.83	16.26	30.61	6.91	11.67	8.98	9.19
<b>60</b>		34.84	16.26	30.62	6.90	11.67	8.97	9.18
<b>0</b>	11:00	34.84	16.26	30.62	6.90	11.67	8.97	9.18

## **ANEXO C**

### **Informe Geotécnico Final Complementario-Pruebas de Carga**

**ZER Geosystem Perú SAC**

**CASO III (Chimbote)**



---

## **7.0 EVALUACIÓN DE LA CIMENTACIÓN EXISTENTE**

### **7.1 Generalidades**

En la fecha de elaboración del presente estudio, el Proyecto Megacentro-Chimbote cuenta con una cimentación existente conformada por pilotes hincados de 6.0 m de longitud que se encuentran localizados en función de los diversos bloques arquitectónicos proyectados para la estructura.

Debido a que durante la construcción de las estructuras del proyecto, la referida cimentación ha presentado un cierto nivel de limitación estructural, basados en la nueva exploración de campo, se ha realizado la evaluación de estas cimentaciones profundas. Para la evaluación se han utilizado los datos obtenidos de los registros de hincado y las pruebas de carga de pilotes, ejecutados por la empresa PILECO S.A.C., que fueran proporcionados por el solicitante, así como de pruebas de carga adicionales realizados por la mencionada empresa durante el desarrollo del presente estudio.

Sobre la base de esta evaluación, se propondrán alternativas de solución que, en conjunto con la cimentación existente, permitan mitigar las vulnerabilidades presentes y proporcionen un nivel de seguridad acorde con la importancia del proyecto.

### **7.2 Características de la Cimentación Existente**

La cimentación existente se encuentra conformada por pilotes hincados agrupados en zapatas, éstas a su vez presentan 3 ó 4 pilotes de acuerdo al tipo de zapata considerada. La distribución de las zapatas se presenta en los siguientes bloques: Bloque A-1, Bloque A-2, Bloque D-1, Bloque D-2 y Bloque D-3.

Los pilotes están diseñados con un concreto de resistencia  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ , poseen una sección transversal cuadrada de 0.35m x 0.35m y 6.0 m de longitud. De acuerdo a lo indicado por PILECO S.A.C., el inicio del nivel de hincado corresponde a una profundidad de 1.2 m, nivel que corresponde al fondo de zapata. Según esta información, y tal como lo confirma PILECO S.A.C. en un documento emitido el 20 de enero del 2011, los pilotes tienen una longitud de hincado que varía de 4.8 m a 5.1 m en promedio, alcanzando una profundidad de 6.0 m por debajo la superficie del terreno.

### **7.3 Pruebas de carga**

Fueron realizados dos campañas de pruebas de carga en los pilotes de la cimentación existente. La primera de estas campañas se realizó en octubre del 2010 y consistió en la

ejecución de 4 ensayos que se realizaron en algunos pilotes distribuidos en los cuatro bloques de la zona de estudio, los cuales presentan los siguientes valores:

**Cuadro 19:** Resultados Prueba de Carga (PILECO SAC, Octubre, 2010)

Ubicación	Asentamiento permanente (mm)	Carga de Trabajo (Ton)
BLOQUE A1 – Eje 7G	0.10	70.0
BLOQUE A2 – Eje 7PA	5.70	70.0
BLOQUE D1 – Eje 7H	5.10	70.0
BLOQUE D2 – Eje 6IA-JA	7.98	70.0

La segunda campaña se realizó entre febrero y marzo de este año en ubicaciones recomendadas por ZER GEOSYSTEM PERÚ de acuerdo a los análisis realizados. Durante la ejecución de los primeros ensayos se contó con personal de ZER GEOSYSTEM PERÚ S.A.C. por lo cual se describe a continuación una breve descripción de las actividades observadas en campo:

### 7.3.1 Ejecución de las pruebas de carga

Los trabajos de implementación de las nuevas pruebas de cargas planificadas para el proyecto se iniciaron el 24 de febrero, fecha desde la cual el personal asignado por ZER GEOSYSTEM PERÚ SAC estuvo presente en el área de estudio presenciando y documentando las diversas actividades que involucraron la ejecución de los ensayos.

Las pruebas de carga se realizaron en los bloques D-1, A-2 y A-1, en zonas cercanas a los pilotes que presentaban menores longitudes de empotramiento los cuales fueron especificados en el informe anterior. Cabe indicar que por motivos de encontrarse avanzados los procesos constructivos de los bloques D-1 y A-1, los cuales presentan una losa de cimentación, se recomendó que las pruebas de carga fueran ejecutadas en las áreas adyacentes al borde de los bloques, en zonas que presentaban las condiciones más desfavorables del terreno y en los cuales el ensayo sería más representativo del comportamiento del suelo.

#### 7.3.1.1 Bloque D-1

La prueba de carga en este bloque fue realizada entre los ejes 7-J y 8-J para lo cual fueron posicionados e hincados tres pilotes denominados P-0703, P-0694 y P-0532. Los pilotes

hincados fueron de las mismas características que los utilizados en la cimentación de los bloques, es decir corresponden a estructuras de concreto de sección cuadrada de 0.35 m de lado, con una longitud de 6.0 m y con una profundidad de hincado que inicia a 1.2 m de profundidad.

Para el hincado de los pilotes fue utilizado un martillo Delmag D-12, logrando para el pilote central P-0694 una longitud de empotramiento de 1.8 m y un número de golpes superiores a 100 en el estrato más profundo.

El equipo empleado para suministrar la carga axial fue una gata hidráulica BAUER-LEONHART con una capacidad máxima de 500 ton que fue operada por el personal de SAMAYCA INGENIEROS SAC.

La prueba de carga se realizó entre los días 27 y 28 de febrero, logrando alcanzar 140 ton de carga máxima y procediendo a la etapa de descarga luego de transcurridas 12 horas de aplicada la carga máxima. Para este ensayo se obtuvo un asentamiento total de 21.4 mm y un asentamiento permanente de 7.9 mm.

Las siguientes fotografías muestran algunas actividades realizadas en esta prueba de carga.



**Fotografía N° 1:** Posicionamiento de los pilotes previo a la etapa de hincado.



**Fotografía N° 2:** Montaje de la viga de reacción sobre los pilotes de apoyo.



**Fotografía N° 3:** Colocación de pilotes para la plataforma de carga.



**Fotografía N° 4:** Ejecución del ensayo. Etapa de aplicación de carga.

### **7.3.1.2 Bloque A-2**

A diferencia de la prueba realizada en el bloque D-1, en este caso sólo se hincaron dos pilotes debido a que el pilote P-0386, recomendado para el ensayo de acuerdo al primer informe, mostraba una ubicación adecuada para la prueba. Sin embargo, debido a que la cabeza de este pilote no poseía las condiciones requeridas por la ejecución del ensayo, éste fue utilizado como pilote de apoyo, procediendo a realizar la prueba en el pilote central P-0691. El ensayo se realizó en el eje 4-KA.

La etapa de carga se inició el día 2 de marzo, sin embargo debido a consideraciones de tiempo por parte del personal de ZER GEOSYSTEM PERÚ, sólo se pudo observar en parte la etapa de carga máxima. Los resultados de esta prueba fueron proporcionados posteriormente por PILECO SAC, los cuales indican que el asentamiento total alcanzado es de 3.4 mm y el asentamiento permanente de 1.1 mm.

Se muestran algunas fotografías de las etapas correspondientes a esta prueba de carga.





**Fotografía N° 5:** Posición final de los pilotes posterior al hincado.



**Fotografía N° 6:** Soldadura y alineamiento de la viga de reacción.



**Fotografía N° 7:** Vista panorámica del montaje del equipo hidráulico.



**Fotografía N° 8:** Colocación de pilotes para la plataforma de carga.

### 7.3.1.3 Bloque A-1

La ejecución de esta prueba no fue presenciada por el personal de ZER GEOSYSTEM PERÚ, pero sí la etapa de implementación e hincado de los pilotes. Esta prueba se realizó entre los ejes 1-D y 1-E y se ubica en las cercanías del sondaje SPT-01.

De acuerdo a los resultados remitidos posteriormente la prueba logró alcanzar las 140 ton de carga máxima con un asentamiento total de 4.1 mm y un asentamiento permanente de 1.3 mm.

Las siguientes fotografías ilustran algunas etapas preliminares a la ejecución de la prueba.



**Fotografía N° 9:** Colocación de las armaduras de apoyo de los pilotes.



**Fotografía N° 10:** Montaje y alineamiento de los pilotes.



**Fotografía N° 11:** Posición final de los pilotes hincados.



**Fotografía N° 12:** Marcado de la longitud de descabezamiento de los pilotes.

De este modo se dieron por finalizadas las labores de campo, aunque como se ha mencionado anteriormente, por motivos de tiempo no fue posible visualizar la totalidad de los ensayos, se puede concluir que la capacidad de carga de los pilotes hincados presenta un mayor valor a lo estimado mediante los métodos analíticos presentados inicialmente.

En resumen, los resultados de las pruebas de carga se listan en el siguiente cuadro:



**Cuadro 20:** Resultados Prueba de Carga (PILECO SAC, Febrero - Marzo, 2011)

Ubicación	Asentamiento total (mm)	Carga de Trabajo (Ton)
BLOQUE D1 – Eje 7,8-J	21.4	70.0
BLOQUE A2 – Eje 4-KA	3.4	70.0
BLOQUE A1 – Eje 1-D,E	4.1	70.0

#### 7.4 Evaluación del empotramiento

Aparte de la posible deficiencia en la capacidad de carga de los pilotes con respecto a la carga de diseño, una condición que los hace más vulnerables es su falta de empotramiento ante la ocurrencia de licuación de suelos. Como se observa en los resultados del análisis de licuación, el suelo licua hasta una profundidad de 4.0 m en promedio, e inclusive en el sector del Bloque A-1, el estrato entre 7.0 m y 8.0 m también presenta licuación. Ante esta evidencia, se ha revisado los registros de hincado de los pilotes y se ha evaluado su longitud de empotramiento, tomando como criterio que el empotramiento se inicia cuando se obtienen valores de número de golpes de hincado iguales o mayores a 20 golpes para penetrar 10 cm de pilote. A partir de esta consideración, se ha determinado la profundidad donde se inicia el empotramiento, la longitud de empotramiento y la longitud de hincado del pilote. Los pilotes que presentan longitudes de empotramiento menores a 0.5 m y mayores a 1.0 m se encuentran identificados y esquematizados en los planos P-07, P-08, P-09 y P-10.

A continuación se presenta una breve descripción de las características de los pilotes hincados existentes en los diversos bloques del proyecto.

##### 7.4.1 Bloque A-1

En este bloque se analizaron los registros de hincado de 139 pilotes cuadrados, de 0.35 m de lado y 6.0 m de longitud. En el Anexo 11 se presenta el listado de los pilotes analizados donde se incluye un dato sobre la longitud de empotramiento, valor que ha sido obtenido tomando el criterio de considerar empotrado el segmento de pilote que presenta una resistencia de hincado mayor a 20 golpes por 10 cm de penetración. Así mismo, en el Cuadro 21 se listan las zapatas que tienen uno o más pilotes con empotramiento menor a 0.5 m. Como se observa en el mencionado anexo, la longitud de empotramiento así obtenida, varía de 0.4 m a 1.5 m, de los cuales solamente 32 pilotes alcanzaron o superaron