

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIEZ ECUACIONES DINÁMICAS DE HINCADO DE PILOTES

Tesis para optar por el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

**Victor Hugo Portugal Quevedo**

**ASESOR: Jorge Zegarra Pellanne**

Lima, junio de 2016

## *Resumen*

*El presente proyecto de investigación presenta la evaluación detallada de las penetraciones obtenidas de 10 ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes para definir los rangos de aplicación de cada una de estas. Para ello fue necesario crear un repertorio casuístico amplio, el cual permitió establecer aquellos parámetros de confiabilidad. Las fórmulas analizadas fueron las de Hiley, Código de Edificaciones de Canadá, Engineering News Record, Delmag, Bénabencq, Eytelwein, Goodrich, Gates, Código Unificado de Edificaciones de la Costa del Pacífico y Janbu, las cuales utilizaron pilotes de madera, acero y concreto, así como 5 tipos de martillos de hincado para definir las penetraciones a ser evaluadas.*



## *Abstract*

*This thesis project presents the detailed evaluation of the penetrations obtained from 10 pile driving formulas in order to define their range of applicability. In order to achieve that objective, it was necessary to establish a wide set of variables in order to analyze the equations and determine their reliability. The utilized formulas are as follows: Hiley, Canadian Building Code, Engineering News Record, Delmag, Bénabencq, Eytelwein, Goodrich, Gates, Unified Building Code of the Pacific Coast and Janbu. These equations used wood, steel and concrete piles with 5 different impact hammers to obtain their penetrations.*

FACULTAD DE  
CIENCIAS E  
INGENIERÍA



PUCP

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIEZ ECUACIONES  
DINÁMICAS DE HINCADO DE PILOTES  
Área : Geotecnia  
Asesor : Jorge Zegarra Pellanne  
Alumno : VICTOR HUGO PORTUGAL QUEVEDO  
Código : 2009.0503.412  
Tema N° : 3  
Fecha : Lima, 14 de junio de 2016



ANTECEDENTES

El uso de las fórmulas de hincada para determinar la penetración de un pilote de ciertas características en el suelo, son métodos muy sencillos de utilizar y de gran difusión, ya sea dentro del ámbito académico o profesional. Sin embargo, existe un gran número de ecuaciones propuestas a lo largo del siglo XX cuyos resultados resultan, en algunas ocasiones, muy diferentes entre sí. De esta manera, es de particular interés investigar sus comportamientos, dado un grupo de casos propuestos, y verificar cualitativa y cuantitativamente las variaciones de diferentes expresiones entre sí.

El presente proyecto propone evaluar cualitativa y cuantitativamente la variación y comportamiento de diez ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes a través del análisis de 270 casos, cada uno con diferentes combinaciones de tipos de pilote y martillo. Estas ecuaciones fueron elegidas sobre la base de su mención y uso en diversos textos académicos y profesionales, y son las más difundidas. Asimismo, los pilotes (madera, acero estructural y concreto armado pretensado) y martillos (diésel, hidráulico y a vapor de acción simple, doble y diferencial) propuestos representan una muestra representativa de lo que está disponible en el mercado actual.

OBJETIVOS

El propósito principal de este proyecto es determinar el rango de variación de las penetraciones que resultaron luego de aplicar las diez ecuaciones de hincada a los 270 casos de pilotes y definir qué tipo de parámetros se ajustan de mejor manera a cada fórmula y viceversa. En base a las magnitudes de las penetraciones obtenidas de cada ecuación, se podrá evaluar la relación que guardan entre sí y los parámetros bajo los cuales su uso es adecuado o confiable.

Dentro de los objetivos específicos de la investigación se encuentran los siguientes:

- Definir las ecuaciones dinámicas más utilizadas dentro de las mencionadas en los registros geotécnicos de las últimas décadas.
- Definir los componentes presentes en cada ecuación.

*Handwritten notes:*  
i) t.f.-/  
h... Y; /  
@/

*Handwritten symbols:*  
Á  
@--

FACULTAD DE  
CIENCIAS E  
INGENIERÍA



PUCP

- Definir los parámetros a utilizar en el análisis de las ecuaciones en base a los pilotes y martillos disponibles en el mercado y en la literatura geotécnica.
- Crear tablas dinámicas que integren los casos establecidos con las fórmulas a estudiar.
- Obtener las penetraciones finales por golpe para cada caso de pilote, martillo y ecuación analizada.
- Realizar la depuración de los resultados de las penetraciones obtenidas mediante métodos estadísticos para descartar valores fuera de un margen de error establecido.
- Obtener las variaciones de las penetraciones de cada uno de los casos y ecuaciones válidas de manera que se puedan establecer intervalos de uso confiable de cada ecuación.

#### PROGRAMA A REALIZAR

El trabajo estará dividido en las siguientes fases:

- Marco teórico: Se definirán los conceptos esenciales de conservación y transformación de energía y las leyes físicas necesarias para definir el proceso de hincado de un pilote, así como las variables implicadas en aquel sistema.
- Ecuaciones dinámicas de hincado: Se definirán las diez ecuaciones que serán evaluadas en la investigación, las cuales serán seleccionadas de diferentes fuentes bibliográficas y se definirán sus componentes matemáticos.
- Parámetros seleccionados para la evaluación de las ecuaciones: Se definirán los parámetros de pilotes y martillos de hincado que se utilizarán para evaluar las ecuaciones y sus comportamientos. En total, se armará un repertorio de 270 casos con diferentes combinaciones de pilotes y martillos.
- Análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado: Se analizarán las limitaciones, aplicabilidad de los casos a las ecuaciones y particularidades de cada una de las fórmulas propuestas para realizar una evaluación fidedigna y completa.
- Evaluación de los resultados: Se evaluarán los resultados obtenidos a través de las diez ecuaciones, así como las tendencias de las curvas de penetraciones y las diferencias y similitudes existentes entre las ecuaciones.
- Conclusiones: Se presentarán las conclusiones más importantes provenientes de la evaluación, así como la validez y aplicabilidad de cada una de las 10 ecuaciones de hincado propuestas

#### NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.





## *Dedicatoria*

*Desde el momento que conocí los aspectos de esta profesión, mi deseo más grande ha sido dominarla para, algún día, poder viajar por el mundo aplicando mis conocimientos y aprendiendo nuevas cosas. De esta manera podré contribuir al mundo con mis ideas e iniciativa, sobre todo al Perú, mi patria, que necesita de la ayuda de profesionales competentes y con sed de progreso para poder seguir creciendo en la dirección correcta y no sucumbir en la mediocridad. Es por ello que quiero dedicar este trabajo, de casi 2 años de esfuerzo constante, a mi familia y amigos. Gracias por haberme acompañado y dado su apoyo y amistad a lo largo de este trayecto tan importante de mi vida.*

## Agradecimientos y Reconocimientos

*Este proyecto de investigación, si bien fue realizada por mi persona en su totalidad, no fue del todo un trabajo individual, ya que muchas personas, entre familiares, amigos, colegas, profesores y profesionales contribuyeron de distintas maneras en su creación. Es por eso que, en primer lugar, agradezco a mi asesor, el ingeniero Jorge Zegarra Pellanne, por su gran paciencia, disposición, flexibilidad y contribución académica brindada durante este año de investigación. Sus clases fueron el inicio de mi naciente interés por la geotecnia, lo cual me llevó a informarme más acerca del tema y a tomar electivos que me ayudaran a entender más esta rama tan interesante de la ingeniería. Si bien nuestras reuniones fueron esporádicas y distanciadas, nuestras conversaciones resultaron muy placenteras y motivadoras desde el punto de vista académico y personal. Su experiencia profesional y su disposición ayudaron a ser de esta tesis lo que es hoy. Segundo, a los demás profesionales que contribuyeron en este trabajo con sus muy valiosas opiniones técnicas: los ingenieros Guillermo Zavala, Jorge Romero, Alejandro de Jong, Juan José Tamayo, Paulo Albuquerque y Augusto Alza; agradezco el tiempo que me brindaron al atender mis inquietudes, responder las preguntas que tenía y referenciarme bibliografía y personas que pudieran ayudarme a resolver mis dudas. De igual manera, agradezco a mis colegas de Clasem SAC y OHL Sucursal del Perú, por su flexibilidad en permitirme avanzar mi trabajo en las instalaciones de la empresa y su motivación e interés constante en que concluya mi tesis. Agradezco a todos mis amigos de la facultad de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú, por haberme brindado su amistad y tantos recuerdos y momentos increíbles. Agradezco en especial a Alvaro Ramos, Ivett Chacaltana y Rosa María Díaz, por motivarme durante las horas en las que trabajamos conjuntamente nuestras tesis de bachillerato, por presionarme y resondrarme cuando se aproximaban las fechas de entrega y por siempre darme su apoyo cuando más lo necesitaba. De igual manera, agradezco a mis amigos de la promoción XIV del colegio Sir Alexander Fleming, en especial a Javier Manrique, Daniela Britto, Alejandro Mantilla, Andrea Albán, Daniel Salaverry, Ricardo Hayayumi, Lorena Rubina y Carolina Delgado, por siempre mantenerme de buenos ánimos y recordarme todos los días que la verdadera amistad persiste en el tiempo y cualquier distancia. Por último, pero sin menor importancia, quiero agradecer a toda mi familia, por su incondicional apoyo en los momentos difíciles y por su motivación constante. En especial, a mis padres, por sus sabios consejos y amor incesante durante los días y madrugadas de arduo trabajo, y a mis hermanos, por su apoyo moral constante, su interés en mi trabajo y por motivarme a luchar cada día para alcanzar el éxito.*

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>Tabla de contenidos</b> .....	<b>i</b>
<b>Lista de fotografías</b> .....	<b>iv</b>
<b>Lista de gráficos</b> .....	<b>v</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>ix</b>
<b>Lista de ilustraciones</b> .....	<b>xii</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Lista de fórmulas</b> .....	<b>xiv</b>
<b>Lista de términos técnicos empleados</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b> .....	<b>3</b>
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos .....	3
<b>3. Marco teórico</b> .....	<b>4</b>
3.1. Componentes en el proceso de instalación de un pilote mediante hincado ...	4
3.1.1. El martillo .....	4
3.1.2. El pilote .....	8
3.2. Transformación y transferencia de energía.....	15
3.2.1. Conservación de la energía: pérdidas de energía en el sistema.....	16
a. Compresiones elásticas temporales .....	18
b. Pérdidas de energía por el mecanismo del martillo (Eficiencia del martillo: $\alpha$ ) .....	21
c. Pérdidas de energía durante el impacto (Eficiencia de transferencia de energía: $\eta$ ) .....	22
<b>4. Ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes utilizadas en el proyecto</b> .....	<b>25</b>
4.1. Ecuación de Hiley (R. Chellis) .....	26
4.2. Ecuación del Código Canadiense de Edificaciones (Afolayan y Opeyemi). ..	28
4.3. Ecuación de Engineering News (Poulos y Davis) .....	28
4.4. Ecuación de Delmag (J. Zegarra).....	29
4.5. Ecuación de Bénabencq (Z. Davidian) .....	30
4.6. Ecuación de Eytelwein (Z. Davidian).....	30
4.7. Ecuación de Goodrich (Z. Davidian) .....	32
4.8. Ecuación de Gates (Poulos y Davis).....	32
4.9. Ecuación del Código Unificado de Edificaciones de la Costa del Pacífico (Afolayan y Opeyemi) .....	33

4.10. Ecuación de Janbu (Simons y Menzies).....	34
<b>5. Metodología e hipótesis del proyecto.....</b>	<b>37</b>
<b>6. Parámetros de evaluación de las ecuaciones dinámicas de hincado.....</b>	<b>39</b>
6.1. Pilotes.....	40
6.1.1. Pilotes de madera latifoliada (tropical) peruana.....	41
6.1.2. Pilotes de acero estructural.....	46
6.1.3. Pilotes pretensados de concreto armado.....	51
6.2. Martillos.....	56
6.2.1. Martillos diésel.....	56
6.2.2. Martillos hidráulicos de caída libre.....	59
6.2.3. Martillos a vapor de acción simple, doble y diferencial.....	59
6.2.4. Eficiencias mecánicas de los martillos investigados.....	62
6.2.5. Parámetros de los martillos elegidos para el análisis.....	62
6.3. Eficiencia de transmisión de energía durante el impacto.....	63
<b>7. Análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado.....</b>	<b>66</b>
7.1. Análisis de la ecuación de Hiley.....	69
7.2. Análisis de la ecuación de CEC.....	70
7.3. Análisis de la ecuación de ENR.....	71
7.4. Análisis de la ecuación de Delmag.....	72
7.5. Análisis de la ecuación de Bénabencq.....	73
7.6. Análisis de la ecuación de Eytelwein.....	74
7.7. Análisis de la ecuación de Goodrich.....	75
7.8. Análisis de la ecuación de Gates.....	76
7.9. Análisis de la ecuación de CUECP.....	77
7.10. Análisis de la ecuación de Janbu.....	78
<b>8. Evaluación de los resultados obtenidos.....</b>	<b>80 (y Anexo 14 – 1)</b>
8.1. Evaluación de los valores numéricos recibidos del análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado (del capítulo 7).....	Anexo 14 - 1
8.2. Aplicación de la metodología estándar de filtración de datos y la obtención de los valores preliminares de las penetraciones para la evaluación.....	Anexo 14 - 3
8.3. Aplicación de la metodología de filtración adaptada a las propiedades de los casos en base a lo obtenido en la metodología de filtración estándar y la obtención de los valores finales de las penetraciones para la evaluación.....	Anexo 14 - 14
8.4. Ordenamiento de los casos evaluados en base a los resultados preliminares obtenidos.....	Anexo 14 - 17
8.5. Evaluación de la variación muestral de las magnitudes de las penetraciones de los casos evaluados.....	Anexo 14 - 20
8.6. Magnitudes de las penetraciones obtenidas y su relación con las características de los casos evaluados.....	Anexo 14 - 31
8.7. Afinidad de las ecuaciones a los casos martillo-pilote evaluados.....	Anexo 14 - 40
8.8. Tipos de valores obtenidos en los casos evaluados.....	Anexo 14 - 48

8.9. Evaluación del comportamiento integral de las curvas de penetraciones obtenidas de las ecuaciones dinámicas de hincado.....	Anexo 14 - 64
8.9.1. Comportamiento de las curvas de tendencia de las penetraciones obtenidas a través de las ecuaciones dinámicas de los casos de pilotes de madera tropical peruana hincados con los 5 martillos propuestos ...	Anexo 14 - 68
8.9.2. Comportamiento de las curvas de tendencia de las penetraciones obtenidas a través de las ecuaciones dinámicas de los casos de pilotes de acero estructural hincados con los 5 martillos propuestos .....	Anexo 14 - 82
8.9.3. Comportamiento de las curvas de tendencia de las penetraciones obtenidas a través de las ecuaciones dinámicas de los casos de pilotes de concreto armado pretensado hincados con los 5 martillos propuestos .....	Anexo 14 - 96
<b>9. Conclusiones .....</b>	<b>81</b>
<b>10. Bibliografía .....</b>	<b>98</b>
<b>11. Anexos digitales .....</b>	<b>CD incluido</b>
11.1. Anexo 1 “Análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado” ....	CD incluido
11.2. Anexo 2 “Resultados de las penetraciones previo al proceso de filtración combinado”.....	CD incluido
11.3. Anexo 3 “Metodología de filtración estándar” .....	CD incluido
11.4. Anexo 4 “Resultados de la filtración estándar”.....	CD incluido
11.5. Anexo 5 “Metodología de filtración adaptada”.....	CD incluido
11.6. Anexo 6 “Resultados de la filtración adaptada” .....	CD incluido
11.7. Anexo 7 “Análisis de la variación de los CVs de los resultados de la filtración estándar” .....	CD incluido
11.8. Anexo 8 “Análisis de la variación de los CVs de los resultados de la filtración adaptada”.....	CD incluido
11.9. Anexo 9 “Afinidad de las ecuaciones a los casos evaluados”....	CD incluido
11.10. Anexo 10 “Tipos de valores obtenidos por caso”.....	CD incluido
11.11. Anexo 11 “Evaluación de las magnitudes de las penetraciones de los pilotes”.....	CD incluido
11.12. Anexo 12 “Comparación de los valores de CV de las metodologías de filtración estándar y adaptada” .....	CD incluido
11.13. Anexo 13 “Comportamiento de las curvas de tendencia de las penetraciones de las ecuaciones”.....	CD incluido
11.14. Anexo 14 “Evaluación de los resultados (continuación del capítulo 8)” .	CD incluido

## *Lista de fotografías*

Fotografía 1: <i>Proceso de hincado de pilotes de acero de sección H</i> .....	1
Fotografía 2: <i>Martillo diésel Delmag izado hincando pilotes tubulares de acero para un muelle</i> .....	7
Fotografía 3: <i>Cimentación profunda con pilotes de sección H</i> .....	11
Fotografía 4: <i>Cimentación offshore con pilotes tubulares</i> .....	11
Fotografía 5: <i>Manufacturación de pilotes de concreto armado pretensado de sección tubular</i> .....	12
Fotografía 6: <i>Manufacturación de pilotes de concreto armado pretensado de sección octogonal</i> .....	12
Fotografía 7: <i>Cimentación profunda con pilotes octogonales de concreto armado pretensados</i> .....	13



## Lista de gráficos

Gráfico 1: Cálculo de las compresiones elásticas temporales en el cabezal según del BSP Pocket Book de 1969.....	20
Gráfico 2: Cálculo de las compresiones elásticas temporales en el cabezal según del BSP Pocket Book de 1969.....	27
Gráfico 3: Cálculo de las compresiones elásticas temporales en el suelo según del BSP Pocket Book de 1969.....	27
Gráfico 4: Valores de las penetraciones “s” obtenidas a través de las 10 ecuaciones dinámicas de hincado y las características del pilote #12 y los 5 martillos .....	68
Gráfico 5: Ecuaciones más próximas a la curva de la media a lo largo de los valores de $R_{m\acute{a}x}$ para los casos de pilotes de madera hincados con los 5 martillos evaluados .....	88
Gráfico 6: Ecuaciones más próximas a la curva de la media a lo largo de los valores de $R_{m\acute{a}x}$ para los casos de pilotes de acero hincados con los 5 martillos evaluados .....	91
Gráfico 7: Ecuaciones más próximas a la curva de la media a lo largo de los valores de $R_{m\acute{a}x}$ para los casos de pilotes de concreto hincados con los 5 martillos evaluados .....	94
Gráfico 8: Incongruencias en las magnitudes de las penetraciones obtenidas en los pilotes de concreto hincados con martillo diésel .....	96
Gráfico 1: Representación gráfica de los resultados iniciales obtenidos de la fase de análisis de las ecuaciones de hincado del capítulo 7.....	Anexo 14 - 2
Gráfico 2: Dispersión de los valores iniciales de las penetraciones obtenidas a través de las 10 ecuaciones.....	Anexo 14 - 4
Gráfico 3: Demostración de la aplicación de la metodología de filtración estándar propuesta	Anexo 14 - 6
Gráfico 4: Aplicación del ciclo de filtración #1 con $K=1.50$ .....	Anexo 14 - 9
Gráfico 5: Aplicación del ciclo de filtración #2 con $K=1.50$ .....	Anexo 14 - 10
Gráfico 6: Aplicación del ciclo de filtración #3 con $K=1.50$ .....	Anexo 14 - 10
Gráfico 7: Valores restantes de la “muestra final” o “ $S_{final}$ ” del pilote 11 luego del proceso de filtración estándar.....	Anexo 14 - 12
Gráfico 8: Interpretación gráfica de la metodología de filtración estándar aplicada con los resultados iniciales – Reducción de los rangos admisibles .....	Anexo 14 - 13
Gráfico 9: Variación del coeficiente de variación durante las etapas de filtración de la metodología de filtración estándar .....	Anexo 14 - 13
Gráfico 10: Valores restantes de la “muestra final” o “ $S_{final}$ ” del pilote 11 luego del proceso de filtración estándar .....	Anexo 14 - 16
Gráfico 11: Ejemplo de comparación de los coeficientes de variación finales luego de ambos procesos de filtración por ambas metodologías .....	Anexo 14 - 17
Gráfico 12: Ordenamiento de los resultados obtenidos en base a la resistencia máxima de hincado “ $R_{m\acute{a}x}$ ” en orden ascendente.....	Anexo 14 - 20

Gráfico 13: Variación de los valores de CV durante los ciclos de filtración adaptada para los casos de pilotes de madera hincados con martillo a vapor de acción doble.....	Anexo 14 - 24
Gráfico 14: Representación gráfica de las magnitudes de las penetraciones del pilote de madera latifoliada peruana #5 bajo la influencia de los diferentes martillos....	Anexo 14 - 32
Gráfico 15: Interpretación gráfica de la disminución de las magnitudes de las penetraciones con la ecuación de Gates .....	Anexo 14 - 32
Gráfico 16: Interpretación gráfica de la disminución de las magnitudes de las penetraciones con la ecuación de Hiley.....	Anexo 14 - 33
Gráfico 17: Variación de la eficiencia de impacto según la magnitud de la relación " $W_M / W_P$ " .....	Anexo 14 - 35
Gráfico 18: Variación de la eficiencia de impacto para cada martillo en base a la magnitud del peso del pilote .....	Anexo 14 - 35
Gráfico 19: Variación de la energía transferida al pilote según el tipo de martillo y la magnitud de la eficiencia de impacto de los casos D, H, V1, V2 y V3-45 .....	Anexo 14 - 37
Gráfico 20: Variación de la eficiencia de impacto para un valor fijo de $W_P = 10,000$ kg y valores variables de "e" y " $W_M$ " .....	Anexo 14 - 38
Gráfico 21: Decrecimiento de las penetraciones en base al aumento del valor de la resistencia ejercida por el suelo " $R_{m\acute{a}x}$ " .....	Anexo 14 - 39
Gráfico 22: Tipos de valores obtenidos en los casos de pilotes de concreto armado pretensado hincados con el martillo a vapor de acción doble .....	Anexo 14 - 48
Gráfico 23: Tipos de penetraciones obtenidas en los casos D-19 a D-36 .....	Anexo 14 - 53
Gráfico 24: Tipos de penetraciones obtenidas en los casos H-19 a H-36 .....	Anexo 14 - 55
Gráfico 25: Tipos de penetraciones obtenidas en los casos V3-37 a V3-54.....	Anexo 14 - 63
Gráfico 26: Curvas de tendencia de las penetraciones obtenidas a través de las 10 ecuaciones dinámicas de hincado .....	Anexo 14 - 64
Gráfico 27: Formas que adoptaron las curvas de tendencia de las penetraciones a través de las 10 ecuaciones dinámicas de hincado .....	Anexo 14 - 65
Gráfico 28: Variación de las tasas de decrecimiento de las curvas de las ecuaciones de Hiley, Delmag y Gates.....	Anexo 14 - 66
Gráfico 29: Análisis de la validez práctica de algunas ecuaciones en base al número de valores que proporcionaron para la evaluación .....	Anexo 14 - 67
Gráfico 30: Inclusión de valores sueltos en la evaluación del comportamiento de las curvas de penetraciones de las ecuaciones dinámicas .....	Anexo 14 - 67
Gráfico 31: Definición de los rangos de variación de las penetraciones de las ecuaciones evaluadas en base a los valores máximos y mínimos de cada caso.....	Anexo 14 - 68
Gráfico 32: Proximidad de las curvas de Delmag y Janbu a la del promedio para los intervalos de " $R_{m\acute{a}x}$ " mencionados.....	Anexo 14 - 69
Gráfico 33: Proximidad marcada entre las penetraciones de las curvas de Janbu y Hiley .....	Anexo 14 - 70
Gráfico 34: Proximidad de las penetraciones de las curvas de Hiley y Janbu a la del promedio .....	Anexo 14 - 71

Gráfico 35: Proximidad marcada entre las curvas de Hiley y Janbu.....	Anexo 14 - 72
Gráfico 36: Diferencia entre las tasas de decrecimiento de las magnitudes de las penetraciones de las curvas de Gates y Goodrich .....	Anexo 14 - 73
Gráfico 37: Cercanía marcada de las penetraciones de las ecuaciones de Hiley y Janbu a la curva del promedio .....	Anexo 14 - 74
Gráfico 38: Proximidad notoria entre las curvas de Hiley y Janbu para los casos hincados con martillo a vapor de acción simple .....	Anexo 14 - 75
Gráfico 39: Cruce de curvas ocasionado por la diferencia en la velocidad de decrecimiento de las ecuaciones de CEC y Janbu .....	Anexo 14 - 76
Gráfico 40: Proximidad de las penetraciones de las ecuaciones de CEC, Janbu y Hiley a la curva del promedio .....	Anexo 14 - 77
Gráfico 41: Cercanía muy marcada entre las penetraciones de Hiley y Gates en los casos de madera hincados con martillo a vapor de acción doble .....	Anexo 14 - 78
Gráfico 42: Cruce de las curvas de Janbu y CEC ocasionado por la diferencia entre las tasas de decrecimiento de las penetraciones de ambas ecuaciones .....	Anexo 14 - 79
Gráfico 43: Proximidad de las curvas de CEC, Janbu y Gates a la del promedio	Anexo 14 - 80
Gráfico 44: Proximidad de las curvas de Gates y Hiley entre sí .....	Anexo 14 - 81
Gráfico 45: Proximidad entre las penetraciones de las curvas de Janbu y Gates a partir de $R_{m\acute{a}x} \geq 380,000$ kg .....	Anexo 14 - 83
Gráfico 46: Proximidad marcada entre las curvas de Delmag y Janbu hasta $R_{m\acute{a}x} \leq 513,660.74$ kg .....	Anexo 14 - 83
Gráfico 47: Cruces de las curvas de Hiley y CEC sobre la de Gates causados por la diferencia en las tasas de decrecimiento de las penetraciones .....	Anexo 14 - 84
Gráfico 48: Cercanía de la curva del promedio a las penetraciones de Hiley y CEC ...	Anexo 14 - 86
Gráfico 49: Proximidad de las curvas de Gates y Janbu a la de la media y entre ellas.	Anexo 14 - 87
Gráfico 50: Diferencia marcada entre las tasas de decrecimiento de las curvas de Hiley, CEC y Gates causó cruces de las primeras sobre la última .....	Anexo 14 - 88
Gráfico 51: Proximidad de las curvas de Gates y Janbu a los valores de la media dentro del rango de $R_{m\acute{a}x} \in [234,638.37 ; 800,000.00]$ kg .....	Anexo 14 - 89
Gráfico 52: Proximidad marcada entre CEC y Janbu para $R_{m\acute{a}x} \in [187,984.85 ; 225,289.80]$ kg, así como Janbu y Gates a partir de $R_{m\acute{a}x} > 225,289.80$ kg .....	Anexo 14 - 90
Gráfico 53: Proximidad de las ecuaciones de Gates y Janbu a la media a partir de $R_{m\acute{a}x} > 187,984.85$ kg .....	Anexo 14 - 92
Gráfico 54: Proximidad de las curvas de Janbu y Gates entre sí y diferencia en tasas de decrecimiento para $R_{m\acute{a}x} \leq 200,000.00$ kg .....	Anexo 14 - 93
Gráfico 55: Proximidad de las curvas de Janbu y Gates a la media hasta $R_{m\acute{a}x} \leq 800,000.00$ kg debido a que fueron las únicas disponibles dentro del intervalo mencionado	Anexo 14 - 94

Gráfico 56: <i>Diferencia entre las tasas de decrecimiento de Janbu y Gates generaron un traslape de las penetraciones alrededor de <math>R_{m\acute{a}x} = 900,000.00</math> kg</i> .....	Anexo 14 - 95
Gráfico 57: <i>Descarte de las penetraciones de Hiley y CEC dentro del rango de <math>R_{m\acute{a}x} &lt; 800,000.00</math> kg por no ser representativas para el uso adecuado de la ecuación</i> Anexo 14 - 96	
Gráfico 58: <i>Proximidades marcadas entre las penetraciones de las curvas de Hiley, Delmag y Janbu</i> .....	Anexo 14 - 97
Gráfico 59: <i>Diferencia entre las tasas de decrecimiento de las penetraciones de las curvas de Hiley, Janbu y Gates</i> .....	Anexo 14 - 98
Gráfico 60: <i>Decrecimiento mayor de la curva de CEC a partir de valores de <math>R_{m\acute{a}x} &lt; 300,000.00</math> kg en comparación con la curva de Gates</i> .....	Anexo 14 - 99
Gráfico 61: <i>Proximidad marcada entre las curvas de Hiley y Janbu, así como entre las curvas de Hiley, Janbu y Gates a partir de <math>R_{m\acute{a}x} \geq 481,727.21</math> kg</i> .....	Anexo 14 - 100
Gráfico 62: <i>Variación de las tasas de decrecimiento de las curvas de Hiley y Janbu en comparación a la de Gates</i> .....	Anexo 14 - 101
Gráfico 63: <i>Cercanía de los valores de las curvas de CEC y Gates a la curva promedio</i> .....	Anexo 14 - 102
Gráfico 64: <i>Proximidad marcada entre las penetraciones de las curvas de Janbu y Hiley para los casos hincados de pilotes de concreto armado pretensados hincados con martillo a vapor de acción simple (V1)</i> .....	Anexo 14 - 103
Gráfico 65: <i>Proximidad entre las ecuaciones de Hiley, CEC, Gates y Janbu</i> ..	Anexo 14 - 106
Gráfico 66: <i>Variación en las tasas de decrecimiento entre las ecuaciones de Janbu y Gates</i> .....	Anexo 14 - 107

## *Lista de tablas*

Tabla 1: <i>Eficiencias mecánicas de los martillos de hincado utilizados en el proyecto de investigación</i> .....	22
Tabla 2: <i>Especies de madera latifoliada nativas del Perú</i> .....	41
Tabla 3: <i>Grupos de madera estructural en base a rangos de densidad básica</i> .....	42
Tabla 4: <i>Descripción de categorías de madera estructural</i> .....	42
Tabla 5: <i>Especies de madera latifoliada o tropical peruana elegidas para el análisis</i> .....	43
Tabla 6: <i>Propiedades mecánicas de las especies elegidas en estado verde</i> .....	43
Tabla 7: <i>Pilotes de madera latifoliada peruana de sección circular utilizados en el análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes</i> .....	45
Tabla 8: <i>Pilotes de madera latifoliada peruana de sección cuadrangular utilizados en el análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes</i> .....	46
Tabla 9: <i>Tamaños de secciones de pilotes H de TATA Steel</i> .....	47
Tabla 10: <i>Tamaños de secciones de pilotes H de la norma AISC</i> .....	47
Tabla 11: <i>Tamaños de secciones de pilotes H del catálogo de LB Foster</i> .....	47
Tabla 12: <i>Tamaños de secciones de pilotes H de la tabla de Bethlehem Steel del libro de R. Chellis</i> .....	47
Tabla 13: <i>Tamaños de secciones de pilotes H elegidos para el análisis</i> .....	48
Tabla 14: <i>Tamaños de secciones de pilotes tubulares de AISC</i> .....	48
Tabla 15: <i>Tamaños de secciones de pilotes tubulares de TATA Steel</i> .....	48
Tabla 16: <i>Tamaños de secciones de pilotes tubulares de LB Foster</i> .....	48
Tabla 17: <i>Tamaños de secciones de pilotes tubulares elegidos para el análisis</i> .....	49
Tabla 18: <i>Pilotes de acero estructural de sección H utilizados en el análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes</i> .....	51
Tabla 19: <i>Pilotes de acero estructural de sección tubular utilizados en el análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes</i> .....	51
Tabla 20: <i>Propiedades mecánicas de los tendones de acero para el pretensado de la sección</i> .....	52
Tabla 21: <i>Resistencias últimas de los tipos de concretos utilizados para la definición de las propiedades mecánicas del concreto y pre-esfuerzos equivalentes</i> .....	53
Tabla 22: <i>Estado de esfuerzos durante el pretensado y luego de pérdidas</i> .....	53
Tabla 23: <i>Secciones octogonales de pilotes de concreto armado pretensado elegidas para el análisis</i> .....	53

Tabla 24: Secciones tubulares de pilotes de concreto armado pretensado elegidas para el análisis .....	54
Tabla 25: Pilotes de concreto armado pretensado de sección octogonal utilizados en el análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes.....	55
Tabla 26: Pilotes de concreto armado pretensado de sección tubular utilizados en el análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes .....	56
Tabla 27: Martillos diésel de Marca McKiernan-Terry .....	57
Tabla 28: Martillos diésel de marca Kobe.....	57
Tabla 29: Martillos diésel de marca Delmag.....	58
Tabla 30: Martillos diésel de marca Linkbelt .....	58
Tabla 31: Martillos hidráulicos de caída libre de marca Yongan Machinery.....	59
Tabla 32: Martillos a vapor de acción simple, doble y diferencial de marca Vulcan .....	60
Tabla 33: Martillos a vapor de acción simple, doble y diferencial de marca Raymond International .....	61
Tabla 34: Martillos a vapor de acción simple y doble de marca McKiernan-Terry .....	61
Tabla 35: Coeficientes de eficiencia mecánica de los martillos de hincado investigados separados por marca y tipo .....	62
Tabla 36: Características físicas y mecánicas de los martillos elegidos para el análisis y sus eficiencias mecánicas .....	63
Tabla 37: Coeficientes de restitución para diferentes condiciones y casos de hincado según diversos autores .....	64
Tabla 38: Coeficientes de restitución utilizados en el análisis .....	65
Tabla 39: Valores de las penetraciones “s” obtenidas a través de las 10 ecuaciones dinámicas de hincado y las características del pilote #12 y los 5 martillos.....	68
Tabla 1: Resultados iniciales obtenidos durante el proceso de análisis de las ecuaciones de hincado del capítulo 7.....	Anexo 14 - 2
Tabla 2: Ordenamiento de los datos obtenidos en el capítulo 7 previo a la filtración ...	Anexo 14 - 5
Tabla 3: Determinación de los indicadores estadísticos necesarios para el proceso de filtración.....	Anexo 14 - 6
Tabla 4: Ordenamiento de los datos obtenidos en el capítulo 7 previo a la filtración ...	Anexo 14 - 8
Tabla 5: Determinación de los indicadores estadísticos necesarios para el proceso de filtración.....	Anexo 14 - 9
Tabla 6: Valores restantes de la “muestra final” o “ $S_{final}$ ” del caso H-11 luego del proceso de filtración estándar.....	Anexo 14 - 11

Tabla 7: *Comparación de las 5 situaciones posibles presentadas luego de la aplicación de las metodologías estándar y adaptada de filtración en distintos casos con martillo V3* ..... Anexo 14 - 16

Tabla 8: *Aceptación de valores de CV no necesariamente iguales o menores a 0.40 dependiendo del caso* ..... Anexo 14 - 21

Tabla 9: *Optación por magnitudes de CV menores a lo necesario para eliminar valores límite que ocasionaban mucha dispersión en los grupos*..... Anexo 14 - 22

Tabla 10: *Coefficientes de restitución utilizados en el análisis* ..... Anexo 14 - 34



## *Lista de ilustraciones*

Ilustración 1: <i>Logo del fabricante de martillos diésel Delmag</i> .....	4
Ilustración 2: <i>Logo del fabricante de martillos a vapor McKiernan-Terry</i> .....	5
Ilustración 3: <i>Logo del fabricante de martillos a vapor Vulcan</i> .....	5
Ilustración 4: <i>Martillos a vapor de acción simple y doble</i> .....	6
Ilustración 5: <i>Martillo diésel</i> .....	8
Ilustración 6: <i>Formas de transmisión de cargas en pilotes</i> .....	9
Ilustración 7: <i>Cimentación profunda con pilotes de madera de sección cuadrangular</i> .....	10
Ilustración 8: <i>Analogía de hincado a través del proceso de martillar un clave dentro de una tabla de madera</i> .....	15
Ilustración 9: <i>Compresión y deformación de un objeto</i> .....	17
Ilustración 10: <i>Tipos de cabezales simples</i> .....	19
Ilustración 11: <i>Composición del desplazamiento de un pilote luego del impacto del martillo: penetración permanente y rebote elástico</i> .....	20
Ilustración 12: <i>Martillo utilizado para ensayos SPT</i> .....	21
Ilustración 13: <i>Colisión elástica</i> .....	23
Ilustración 14: <i>Colisión totalmente inelástica</i> .....	23
Ilustración 15: <i>Proceso de hincado adaptado a la ecuación de Eytelwein</i> .....	31

## *Lista de figuras*

Figura 1: <i>Secciones circulares de los pilotes de madera latifoliada peruana utilizados en el análisis</i> .....	44
Figura 2: <i>Secciones cuadrangulares de los pilotes de madera latifoliada peruana utilizados en el análisis</i> .....	45
Figura 3: <i>Secciones H de los pilotes de acero estructural utilizados en el análisis</i> .....	50
Figura 4: <i>Secciones tubulares de los pilotes de acero estructural utilizados en el análisis</i> ..	50
Figura 5: <i>Secciones octogonales de los pilotes de concreto armado pretensado utilizados en el análisis</i> .....	54
Figura 6: <i>Secciones tubulares de los pilotes de concreto armado pretensado utilizados en el análisis</i> .....	55



## *Lista de fórmulas*

Fórmula 1: Resistencia máxima en un pilote de madera en base a la ASCE.....	13
Fórmula 2: Resistencia máxima en un pilote de acero en base a la ASCE .....	13
Fórmula 3: Resistencia máxima en un pilote de concreto armado pretensado en base a la ASCE .....	13
Fórmula 4: Resistencia máxima en un pilote de madera utilizada en el proyecto de investigación .....	14
Fórmula 5: Resistencia máxima en un pilote de acero utilizada en el proyecto de investigación .....	14
Fórmula 6: Resistencia máxima en un pilote de concreto armado pretensado utilizada en el proyecto de investigación .....	14
Fórmula 7: Concepto de energía potencial.....	15
Fórmula 8: Concepto de energía cinética .....	15
Fórmula 9: Conservación de la energía y detalles.....	17
Fórmula 10: Deformaciones elásticas en un sólido deformable homogéneo.....	17
Fórmula 11: Energía neta obtenida del martillo de hincado .....	22
Fórmula 12: Concepto de eficiencia de impacto .....	24
Fórmula 13: Eficiencia de impacto #1 .....	24
Fórmula 14: Eficiencia de impacto #2 .....	24
Fórmula 15: Ecuación dinámica de Stanton .....	25
Fórmula 16: Transformación de la energía de hincado.....	25
Fórmula 17: Ecuación dinámica de Hiley.....	26
Fórmula 18: Cálculo de las deformaciones elásticas en un sólido deformable y homogéneo	26
Fórmula 19: Ecuación dinámica del Código de Edificaciones de Canadá.....	28
Fórmula 20: Ecuación dinámica del Engineering News Record .....	29
Fórmula 21: Ecuación dinámica de Delmag.....	30
Fórmula 22: Ecuación dinámica de Bénabencq.....	30
Fórmula 23: Ecuación dinámica de Eytelwein .....	32
Fórmula 24: Ecuación dinámica de Goodrich .....	32
Fórmula 25: Ecuación dinámica de Gates para pilotes de madera .....	33
Fórmula 26: Ecuación dinámica de Gates para pilotes de acero .....	33
Fórmula 27: Ecuación dinámica de Gates para pilotes de concreto .....	33
Fórmula 28: Ecuación dinámica del Código Unificado de Edificaciones de la Costa del Pacífico .....	34
Fórmula 29: Ecuación dinámica de Janbu .....	35
Fórmula 30: Eficiencia de impacto .....	63

Fórmula 31: *Ecuación de Bénabencq explicada*.....73

Fórmula 32: *Desviación estándar muestral*.....Anexo 14 - 4

Fórmula 33: *Coficiente de variación muestral*.....Anexo 14 - 5



## *Lista de términos técnicos empleados*

- $R_H$** : Resistencia resultante durante el hincado (kg o lb)
- $R_{m\acute{a}x}$** : Resistencia máxima de hincado (kg o lb)
- $R_{adm}$** : Resistencia admisible del pilote (kg o lb)
- $\alpha$** : Coeficiente de eficiencia mecánica del martillo (adimensional)
- $E_N$** : Energía nominal proporcionada por el martillo (kg.m o lb.pie)
- $\eta$** : Coeficiente de eficiencia de transmisión de energía (adimensional)
- $s$** : penetración final por golpe (cm, mm o pulgadas)
- $C_P$** : Compresiones elásticas temporales en el pilote (cm, mm o pulgadas)
- $C_S$** : Compresiones elásticas temporales en el suelo (cm, mm o pulgadas)
- $C_C$** : Compresiones elásticas temporales en el cabezal (cm, mm o pulgadas)
- $C$** : Compresiones elásticas temporales en el sistema completo (cm, mm o pulgadas)
- $e$** : Coeficiente de restitución de impacto (adimensional)
- $L$** : Longitud del cabezal al centro de resistencia del pilote (m o pies)
- $A$** : Área neta del pilote ( $m^2$ ,  $cm^2$ ,  $pulg^2$  o  $pie^2$ )
- $A_c$** : Área abarcada por concreto ( $m^2$ ,  $cm^2$ ,  $pulg^2$  o  $pie^2$ )
- $A_s$** : Área abarcada por acero ( $m^2$ ,  $cm^2$ ,  $pulg^2$  o  $pie^2$ )
- $E$** : Módulo de elasticidad de Young del pilote ( $kg/cm^2$  o  $lb/pulg^2$ )
- $E_c$** : Módulo de elasticidad de Young del concreto ( $kg/cm^2$  o  $lb/pulg^2$ )
- $E_s$** : Módulo de elasticidad de Young del acero ( $kg/cm^2$  o  $lb/pulg^2$ )
- $H$** : Altura de caída del martillo (m, cm, pulgadas o pies)
- $W_M$** : Peso del martillo (kg o lb)
- $W_P$** : Peso del pilote (kg o lb)
- $c$** : Constante de elasticidad entre el suelo y el pilote (mm/m)
- $B$** : Relación entre el peso del martillo y la suma de los pesos del mazo, pilote y terreno que hace cuerpo con el pilote
- $Z$** : Relación entre el trabajo absorbido para hundir el pilote y la energía total proporcionada por el martillo en el momento del impacto
- $C_o$** : Constante experimental de la fórmula de Goodrich

## 1. Introducción

Durante las últimas décadas, el uso de las fórmulas dinámicas de hincado de pilotes ha descendido dramáticamente en países industrializados, o del primer mundo, debido a la aparición de nuevas tecnologías para la estimación de la penetración de un pilote en el suelo, como el “Pile Dynamic Analyzer” (PDA), la ecuación de onda rotacional, entre otros. Una de las razones por la cual estas ecuaciones se encuentran en un proceso de discontinuidad es debido a que su uso viene acompañado de variaciones que, para la ingeniería de hoy, se consideran exageradas y conllevan a un gasto excesivo, dado que se necesita utilizar un factor de seguridad alto para compensar este margen de error. Sin embargo, son muy prácticas, fáciles de utilizar y reducen mucho el proceso de cálculo para la obtención de la penetración en comparación a las nuevas tecnologías disponibles en el mercado. Esto deja a las ecuaciones dinámicas un cierto atractivo por parte de empresas pequeñas y países que aún se encuentran en vías de desarrollo, como el Perú. Es por esta razón que el presente proyecto de investigación propone establecer los rangos de variación y aplicación para un uso confiable de 10 ecuaciones dinámicas de hincado, las cuales se detallan más adelante, cuando se analizan bajo condiciones de hincado determinadas.



*Fotografía 1: Proceso de hincado de pilotes de acero de sección H (Regional Professional Development Program)*

Para lograr este objetivo, los casos propuestos para el análisis incluyeron diferentes parámetros de evaluación:

- Tipos y mecanismos de martillo (5 tipos de martillos)
- Tipo de material del pilote (3 materiales diferentes)
- Resistencias de los materiales utilizados en los pilotes (3 magnitudes de resistencia por tipo de material)
- Longitud del pilote (3 longitudes asociadas a las magnitudes de resistencia definidas)
- Tipo de sección del pilote (2 tipologías de sección)
- Tamaños de sección del pilote (3 tamaños de área por tipo de sección)

Los parámetros señalados líneas arriba sirvieron de punto de partida para poder evaluar las ecuaciones y determinar qué casos se ajustan a qué ecuación. Entre los aspectos evaluados se encontraron los siguientes puntos:

- Evaluación de la tipología de valores obtenidos para cada caso evaluado
- Evaluación de la afinidad de cada ecuación a los casos propuestos
- Evaluación de la tendencia de crecimiento/decrecimiento de las magnitudes de las penetraciones para cada ecuación evaluada con los casos propuestos
- Evaluación del comportamiento integral de las ecuaciones y los casos evaluados entre sí, como las proximidades entre penetraciones de diversas ecuaciones
- Evaluación de las variaciones de las penetraciones y la obtención de rangos de variación aceptables
- Evaluación de la confiabilidad del uso de las ecuaciones para los casos evaluados

Dicho lo anterior, el presente proyecto de investigación busca determinar el comportamiento y el área de aplicación confiable de cada fórmula dinámica propuesta, por lo que se presentaron las 10 ecuaciones de hincado más utilizadas en el mercado y según el criterio del autor. En el capítulo 4 se describe cada una de ellas en detalle.

## 2. Objetivos del proyecto de investigación

---

### 2.1. Objetivo General

El propósito principal de este proyecto de investigación fue determinar el rango de variación de las penetraciones que resultaron luego de aplicar un cierto número de casos a través de 10 ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes y definir qué tipo de parámetros se ajustan de mejor manera a cada fórmula y viceversa. En base a las magnitudes de las penetraciones obtenidas de cada ecuación, se pudo evaluar la variación de cada una respecto al valor promedio del grupo, lo cual señaló qué tipo de pilotes y martillos pueden utilizarse en cada ecuación y en cuales no resultó confiable utilizarlos.

### 2.2. Objetivos específicos

Entre los objetivos específicos de la investigación se encontró la obtención de la información necesaria para poder formular los parámetros físicos y mecánicos de los martillos y pilotes, los cuales sirvieron para realizar el análisis de las ecuaciones. Entre estos hitos previos al análisis y evaluación de las ecuaciones se encontraron:

- Definir las ecuaciones dinámicas más utilizadas dentro de las mencionadas en los registros geotécnicos de las últimas décadas.
- Definir los componentes presentes en cada ecuación.
- Definir los parámetros a utilizar en el análisis de las ecuaciones en base a los pilotes y martillos disponibles en el mercado y en la literatura geotécnica.
- Crear tablas dinámicas que integren los casos establecidos con las fórmulas a estudiar.
- Obtener las penetraciones finales por golpe para cada caso de pilote, martillo y ecuación analizada.
- Realizar la depuración de los resultados de las penetraciones obtenidas mediante métodos estadísticos para descartar valores fuera de un margen de error establecido.
- Obtener las variaciones de las penetraciones de cada uno de los casos y ecuaciones válidas de manera que se puedan establecer intervalos de uso confiable de cada ecuación.

### 3. Marco teórico del proyecto de investigación

Para comprender adecuadamente el objetivo que tiene este proyecto es necesario entender cada una de los componentes que lo conforman. Se requiere de un conocimiento previo de física básica de movimiento de partículas y sólidos rígidos así como de ingeniería de cimentaciones, ya que el contenido del trabajo es sumamente técnico. Si bien todas las expresiones técnicas se describen al inicio, es necesario tener la capacidad de comprenderlas de antemano, ya que no bastaría la mera interpretación que se brinda. Es pues, entonces, el objetivo de este capítulo brindar el marco teórico suficiente para poder comprender el trabajo que se ha realizado en los acápite siguientes, por lo que el texto se divide de la siguiente manera:

- Componentes en el proceso de instalación de un pilote mediante hincado: Este subcapítulo define los materiales y equipos que tienen un rol durante el proceso de hincado como el martillo, pilote y cabezal.
- Transformación, transferencia y conservación de la energía: Dado que las ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes se basan en la teoría de conservación de la energía, este subcapítulo define las leyes físicas y variables que definen este fenómeno.

#### 3.1. Componentes en el proceso de instalación de un pilote mediante hincado

El sistema de instalación de un pilote está compuesto esencialmente por 3 partes: el martillo, el cabezal y el pilote. Si bien el suelo es un componente de igual importancia, no se incluye el tipo de suelo debido a que las fórmulas no incluyen las características de este, por ser un proceso energético entre el martillo y el pilote únicamente. El martillo genera y brinda la energía al sistema, el cabezal recibe aquella energía y esta viaja a través de este para llegar al pilote, el cual, a su vez, transforma esa energía de impacto en energía de traslación, al penetrar en el suelo una determinada distancia. A continuación se describe cada componente.

##### 3.1.1. El martillo

El martillo es una de las partes más importantes del sistema de instalación, pues es la parte que provee al pilote de la energía necesaria para poder introducirse dentro del suelo una determinada profundidad. Esta energía se conoce como energía



*Ilustración 1: Logo del fabricante de martillos diésel Delmag (<http://www.delmag.com>)*

nominal " $E_N$ " y es afectada por un factor de eficiencia mecánica " $\alpha$ " el cual es determinado por el tipo de mecanismo que posee el martillo.

Existen diversos tipos de martillos, así como compañías que cada año desarrollan nuevas tecnologías para lograr brindarle al mecanismo de accionamiento una mayor eficiencia. Dentro de los tipos más importantes se encuentran los martillos a vapor, diésel e hidráulicos.

Esencialmente, el martillo consiste en 3 partes: un mazo de peso determinado, un mecanismo de acción y un vehículo o medio de transporte o izaje. A continuación, se describe el funcionamiento de cada tipo de martillo mencionado y el rol de cada uno de los componentes dentro del sistema de hincado.



Ilustración 2: Logo del fabricante de martillos McKiernan-Terry (<https://www.apevibro.com/ver2/manual-s-MKT.asp>)

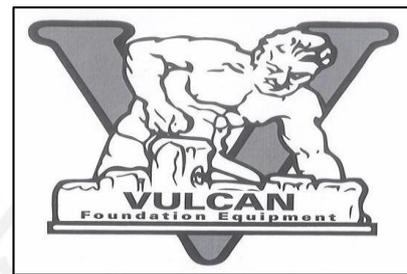


Ilustración 3: Logo del fabricante de martillos a vapor Vulcan (<http://vulcanhammer.com/hammers/>)

#### a. Martillos de caída libre (con gatillo y cabrestante)

Este tipo de martillos fue uno de los primeros en desarrollarse y es el mismo mecanismo en el que se basa el mecanismo de golpeo del ensayo SPT. Dado que ahora existen martillos como los que se señalan líneas abajo, este mecanismo ha entrado en discontinuidad y solo se usa para obras menores. En base a catálogos de décadas anteriores, los pesos de los mazos suelen ser menores y proporcionan energías nominales muy bajas como para ser considerados dentro de este proyecto.

#### b. Martillos a vapor de acción simple, doble y diferencial

Los martillos que funcionan a vapor (o presión de aire) tuvieron su apogeo en las décadas del 60 y 70 y se continúan usando con suma frecuencia. Uno de los principales productores de estos martillos es Vulcan Hammer y proporciona una variedad grande de estos equipos. Entre estos se pueden diferenciar tres tipos de mecanismos de acción: simple, doble y diferencial.

El principio del mecanismo del martillo a vapor de acción simple yace en introducir vapor de agua dentro del pistón, lo que ocasiona que el mazo se eleve. Luego de alcanzar la altura deseada, el orificio por donde se introdujo el vapor a presión, se

convierte en el orificio de escape permitiendo la salida del vapor lo cual, consecuentemente, deja caer el mazo sobre el cabezal del pilote. Esta acción es repetitiva y automática.

A parte del mecanismo de acción simple, como mencionado anteriormente, existen martillos a vapor de acción doble y diferencial. El martillo de doble acción está compuesto por un cilindro grande dentro del cual se encuentra el mazo. A los extremos de este cilindro se conectan tubos a través de los cuales se introduce vapor a presión. La idea es introducir vapor en el vacío inferior al mazo y luego introducir vapor en el vacío superior para ocasionar un aumento de la aceleración de descenso del mismo y generar mayor energía cinética. Si bien este mecanismo genera un mayor momento al instante del impacto, las pérdidas de energía durante el proceso son sustanciales. En cuanto al martillo de acción diferencial, el sistema de accionamiento es idéntico a la del martillo de acción doble pero emplea un método no expansivo de inyección del vapor que reduce las pérdidas de energía del mecanismo. A continuación se muestran las ilustraciones de los mecanismos de martillos a vapor de acción simple y doble.

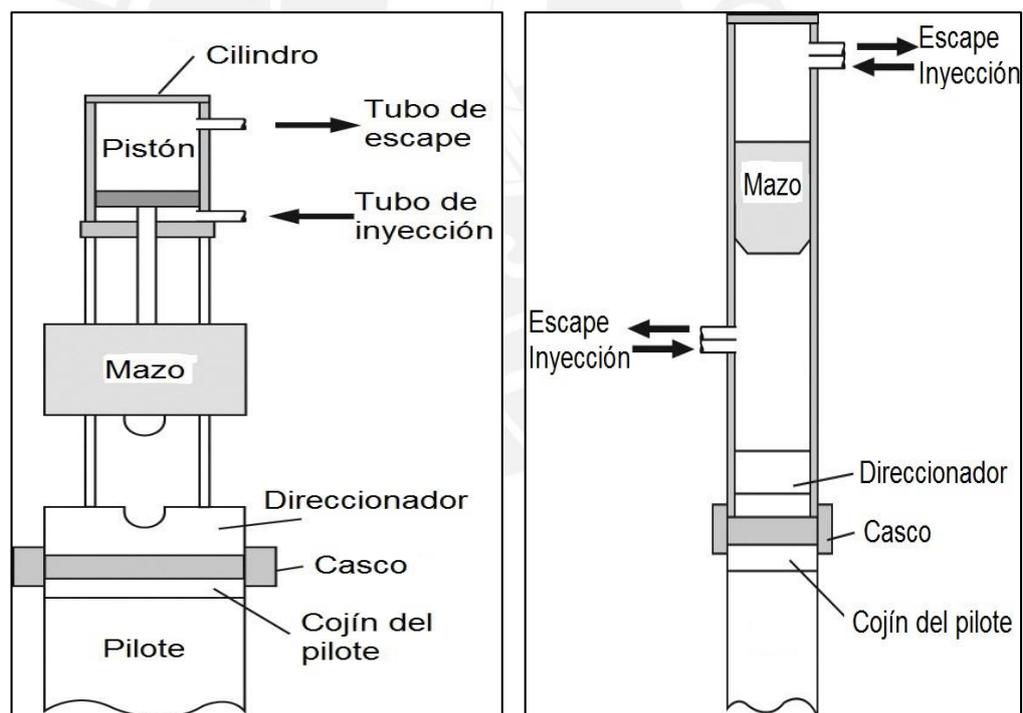


Ilustración 4: Martillos a vapor de acción simple (izquierda) y doble (derecha) (R. Salgado 2013)

### c. Martillos hidráulicos

El martillo hidráulico es, en esencia, un martillo de caída libre el cual es accionado mediante dispositivos hidráulicos y no a través de cuerda y cabrestante. Este tipo de

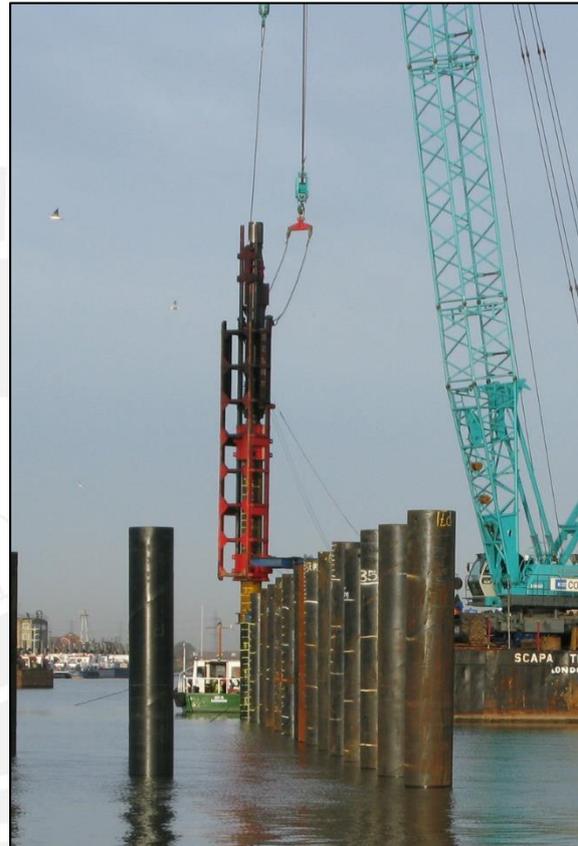
martillo si permite izar mazos de pesos mayores que puedan proporcionar energías nominales lo suficientemente altas como para tener un valor en el mercado actual. Uno de los fabricantes de este tipo de martillos es Yongan Machinery, cuyos martillos fueron tomados en cuenta para esta investigación.

#### d. Martillos diésel

El martillo diésel es un tipo de martillo comúnmente utilizado en la industria de la instalación de pilotes siendo DELMAG una de las compañías más reconocidas en su fabricación. Como el nombre lo indica, utiliza combustible diésel para accionar su mecanismo una vez que el mazo colisiona con la base del martillo. El mecanismo es de acción simple y caída libre, pues la combustión del diésel genera un proceso similar al de martillo a vapor de acción simple.

Los martillos diésel modernos incluyen inyectores de combustible regulables lo cual aumenta o disminuye la magnitud de la explosión dentro de la cámara y, consecuentemente, la energía nominal proporcionada por el martillo. Esto le da a este martillo un atractivo especial en situaciones en las cuales se realizan hincados de pilotes en estratos de suelos con resistencias desconocidas o muy variables: Cuando los estratos de suelo presentan resistencias altas, se puede aumentar la cantidad de combustible que se inyecta a la cámara para generar un golpe de mayor fuerza y viceversa.

A manera de ilustrar el funcionamiento de este tipo de martillos, el proceso de golpeo se muestra al costado y consiste en los siguientes pasos:



Fotografía 2: Martillo diésel Delmag hincando pilotes tubulares de acero para un muelle (<http://www.delmag.com/diesel-pile-hammers.html>)

Primero, se iza el mazo dentro del cilindro hasta la altura especificada y se suelta. En los mismos instantes que el mazo descende, su velocidad y momento en aumento, se inicia la inyección del combustible diésel por el tubo de inyección señalado en el lado izquierdo. Cuando el mazo colisiona con el direccionador, la energía de impacto enciende el combustible causando una explosión, la cual causa que el pilote acelere en dirección al suelo y el mazo en sentido contrario.

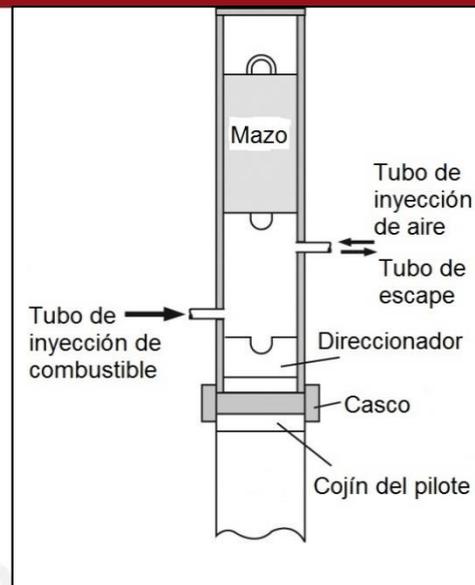


Ilustración 5: Martillo diésel (R. Salgado 2013)

Este proceso es repetitivo y completamente automático, controlado por una computadora.

### 3.1.2. El pilote

El pilote es un elemento estructural y solución de cimentación profunda que se introduce dentro del suelo para poder transferir las cargas verticales de una estructura al suelo cuando este no posee la resistencia suficiente para soportar las cargas de transmitidas por una cimentación superficial, sean zapatas o un platea. Consiste en un elemento similar a una columna que puede ser de madera, acero o concreto armado, dependiendo de las condiciones ambientales y la magnitud de las cargas que se tengan que transmitir al suelo.

Existen dos formas en las que un pilote puede transferir la carga de la superestructura al suelo: por punta o por fricción. La transferencia de cargas por punta usualmente suelen darse cuando los estratos de suelo próximos a la superficie tiene una capacidad portante pobre y existe un estrato de suelo resistente (o roca) a una profundidad accesible. En cambio, la transferencia de cargas por fricción se da cuando no existe un estrato de suelo resistente (o roca) a una profundidad accesible, por lo que los estratos de suelo tendrán que absorber las carga del pilote directamente por fricción. Si bien en la realidad nunca se da solo uno de estos casos, es importante, por cuestiones de seguridad, idealizar qué forma de transferencia es la más importante.

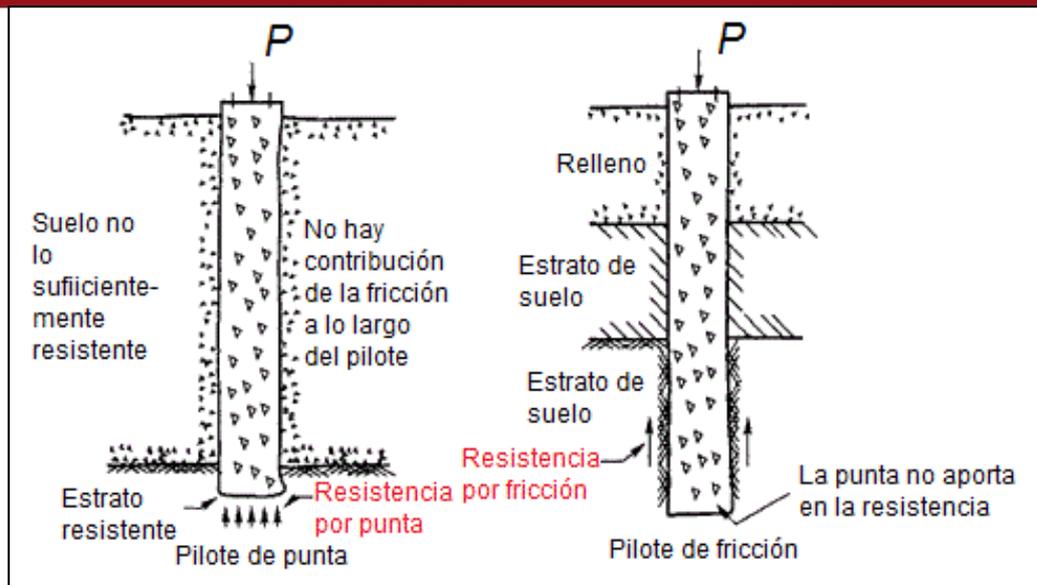


Ilustración 6: Formas de transmisión de cargas en pilotes: por punta (izquierda) y por fricción (derecha)  
 (Imagen modificada de la página web <http://www.abuildersengineer.com>)

Por ejemplo, si se tiene un suelo regular, cargas altas y se ha propuesto una cimentación con pilotes, la carga será asumida por combinación de fricción y punta. Esto se debe a que el suelo no es tan malo y puede generar una resistencia aceptable sobre el área de la punta del pilote y la carga no tendrá que ser asumida solo por fricción. En el caso de tener un suelo muy débil, y sin presencia de estratos resistentes, la carga deberá ser asumida totalmente por fricción, ya que la resistencia generada en la punta es muy pequeña y suele despreciarse por seguridad. En un tercer caso en el cual el suelo sea débil pero exista un estrato resistente a una profundidad razonable, el pilote transferirá su carga por punta directamente a aquel estrato y la fricción podría o no ser considerada dependiendo de la magnitud de su aporte (si su aporte es pequeño es mejor despreciar la contribución por seguridad).

Entonces, como fue explicado, en ciertas ocasiones es mejor asumir una sola forma de transferencia de carga hacia el suelo, para que el diseño pueda ser seguro y tener una holgura de seguridad (un factor de seguridad un poco mayor) en caso sea necesario. Para propósitos de este proyecto de investigación, los casos presentados en el capítulo 6, y que fueron utilizados en el análisis, consideran únicamente la fricción como forma de transmisión de carga. Esto quiere decir que se toma el caso del lado derecho de la ilustración #6 (líneas arriba).

Es importante mencionar que otra de las razones por las cuales solo se ha considerado la contribución de la fuerza de fricción dentro del análisis es porque los pilotes hincados suelen tener el extremo, que primero entra en contacto con el suelo, en forma de punta.

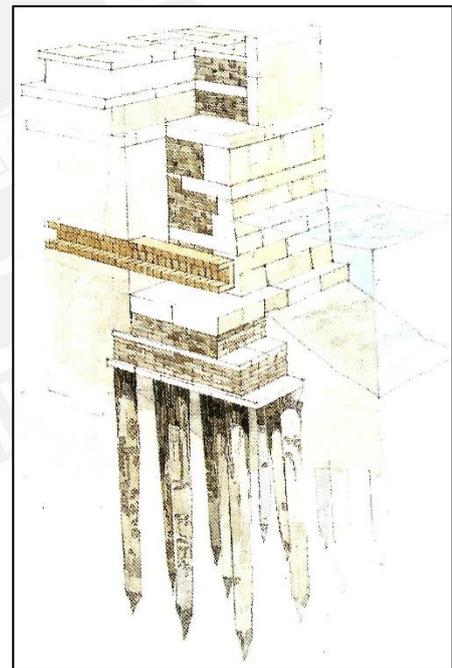
Por ejemplo, en caso de los pilotes de madera de sección circular y rectangular, las puntas tendrían forma cónica y piramidal respectivamente.

En base a lo anterior, entonces, como es lógico asumir, la fricción es una fuerza distribuida a lo largo de la longitud del pilote y depende de las características geotécnicas de los estratos de suelo con los que se está contacto. Sin embargo, este proyecto, como mencionado en capítulos anteriores, no incluye características del suelo dentro del análisis y se asume una fuerza distribuida constante a lo largo del pilote. Esto permite que la fuerza resultante de la fricción se encuentre exactamente en el centro geométrico del pilote, o sea, a mitad de su longitud.

A continuación se presentan los tipos de materiales que serán utilizados en los pilotes analizados, los cuales son madera, acero y concreto armado pretensado. Si bien se puede utilizar una composición de materiales (como pilotes de acero tubulares con armadura en su centro y rellenos de concreto) para el diseño de un pilote, la presente investigación se ha concentrado en los materiales mencionados anteriormente de manera aislada.

#### a. Pilotes de madera

Los pilotes de madera suelen usarse para estructuras temporales o de baja importancia. En décadas anteriores, entre el 40 y 50, esta alternativa de cimentación tenía una popularidad considerable. En el Perú normalmente suelen utilizarse en la selva debido a la alta accesibilidad de madera tropical. Dado que se utilizaría para estructuras temporales, en principio no necesitaría ningún tratamiento, pero, si se quiere extender su período de vida, es aconsejable darle un recubrimiento impermeabilizante para proteger la madera de la variación de la humedad del ambiente, pues esto ocasiona la putrefacción de la madera.



*Ilustración 7: Cimentación profunda con pilotes de madera de sección cuadrangular*  
(<http://venice.umwblogs.org>)

El tipo de sección de estos pilotes depende de las posibilidades de aserrado que se le pueda dar al tronco del árbol que se extrae. Normalmente, estas secciones suelen ser circulares o rectangulares (específicamente cuadrangulares, por un tema de rigidez).

### b. Pilotes de acero estructural

Los pilotes de acero estructural tienen la ventaja de ser de sección pequeña, excelentes para situaciones de cimentación en la cual se necesiten cargas elevadas y haya poco espacio para la instalación o se requiera de una incidencia mínima en obras adyacentes (referido a los pilotes de sección H). Normalmente suelen tener perfiles H o tubulares.



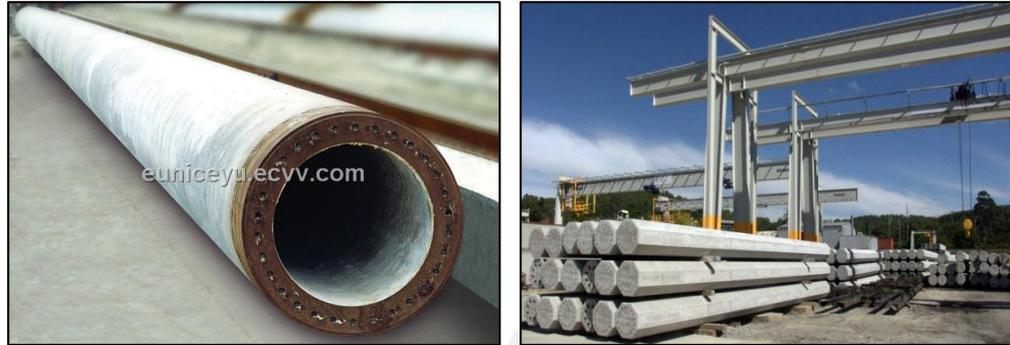
Fotografías 3 y 4: Cimentaciones profundas con pilotes de secciones “H” (izquierda) y tubulares (offshore, a la derecha) (Páginas web <https://www.14thstviaductreplacement.com> y <http://usstubular.com>)

Los perfiles H, al menos en Brasil y otros países industrializados, son usualmente reciclados de vías férreas que fueron desmanteladas por su antigüedad. Dado que el tipo de acero de estos elementos es de alta calidad y su estado es óptimo debido a la protección que se le brindó por estar a la intemperie, las vías férreas son buenas candidatas para esta clase de trabajos. Por otro lado, los perfiles tubulares, una vez hincados, pueden rellenarse con concreto armado para elevar su capacidad estructural.

### c. Pilotes de concreto armado pretensado

Los pilotes de concreto armado pretensado son los más comunes en el mercado debido a su economía y su adaptabilidad a la manufactura. Tienen la ventaja de poder cargar cargas elevadas y tienen una durabilidad prolongada. Cuando existen proyectos en donde el suelo tiene agentes nocivos que puedan ser dañinos para pilotes de madera y acero, el pilote de concreto armado brinda una excelente alternativa. El recubrimiento de concreto aísla por completo los tendones de acero del exterior y retrasa significativamente su deterioro. Además, le brinda al acero un entorno alcalino, el cual

retrasa significativamente la corrosión. Esto solo puede darse siempre y cuando el diseño de mezcla se haya realizado adecuadamente y el concreto de recubrimiento sea de calidad alta y de espesor suficiente.



Fotografías 5 y 6: Manufactura de pilotes de concreto armado pretensado de sección tubular (izquierda) y sección octogonal entera (derecha) (Páginas web <http://www.ecvv.com> y <http://www.sciaust.com.au>)

Las únicas desventajas de este tipo de pilotes yacen en el transporte y el izaje. Dado que el concreto es un material frágil, existe una cierta probabilidad de que, si se sobrepasan los esfuerzos admisibles del material en flexión, se formen grietas que puedan permitir el ingreso de agentes corrosivos dentro de la estructura del pilote. Esta situación aceleraría considerablemente el deterioro estructural del pilote y acortaría su vida útil. Es por esta razón que el pilote, aparte de ser diseñado para cargas de diseño o trabajo verticales, deberá ser diseñado para las cargas de izaje, las cuales podrían deteriorar el pilote antes de haberlo instalado.



Fotografía 6: Cimentación profunda con pilotes octogonales de concreto armado pretensados  
(<http://www.archiexpo.com/architecture-design-manufacturer/>)

#### d. Resistencias máximas de hincado en los pilotes de madera, acero estructural y concreto armado pretensado

Para propósitos de este proyecto de investigación será necesario conocer la capacidad última que posee cada tipo de pilote para luego determinar la carga máxima aplicable durante el hincado, la cual se conoce como “ $R_{m\acute{a}x}$ ”. Estas cargas máximas de hincado se determinaron en base a las expresiones recomendadas del manual de guiamientos para el diseño de cimentaciones con pilotes de la American Society for Civil Engineers (ASCE 1997, página 13):

- Madera:

$$R_{m\acute{a}x} = 2(\sigma_{admisible})(A)$$

- Acero:

$$R_{m\acute{a}x} = 0.9(\sigma_y)(A)$$

- Concreto armado pretensado:

$$R_{m\acute{a}x} = [(0.85f'_c) - f_{pe}](A_c - A_s)$$

Dado que es vital salvaguardar la integridad del material del pilote durante el proceso de hincado, se vio necesario modificar ligeramente las expresiones mencionadas arriba, para insertar una cierta holgura en el momento de determinar la carga máxima de hincado. De esta manera, las ecuaciones utilizadas para calcular “ $R_{m\acute{a}x}$ ” fueron las siguientes:

- Madera:

$$R_{m\acute{a}x} = 0.75(\sigma_{rotura})(A)$$

- Acero:

$$R_{m\acute{a}x} = 0.9(\sigma_y)(A)$$

- Concreto armado pretensado:

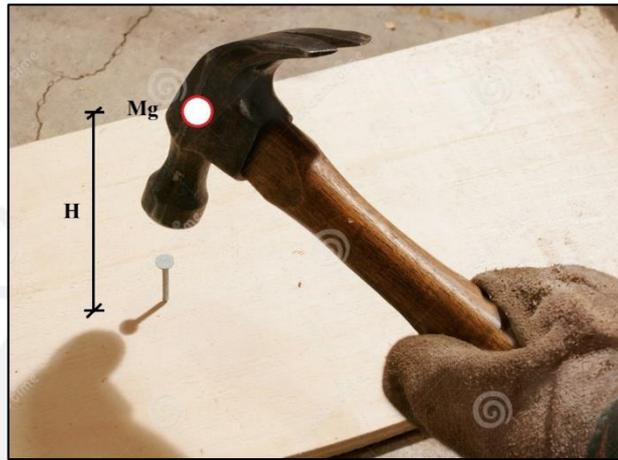
$$R_{m\acute{a}x} = 0.85[(0.85f'_c) - f_{pe}](A_c - A_s)$$

En el caso de la fórmula de la carga máxima de hincado en pilotes de madera, se vio pertinente utilizar el esfuerzo de rotura de la madera ya que, como se verá en el capítulo 6 del presente proyecto, la bibliografía citada utiliza la densidad básica de la madera para calcular el esfuerzo de rotura. Al reducirla a un 75% de su magnitud total, se obtiene una carga máxima de hincado prudente, a manera de prevenir fisuras prematuras entre las vetas. En cuanto a la expresión utilizada para los pilotes de concreto armado pretensado se vio necesario reducir en un 15% adicional la carga máxima (que incluye el preesfuerzo) para prevenir el deterioro prematuro en la interfaz cemento-agregado en el concreto.

Finalmente, en el caso de los pilotes de acero estructural, dado que las expresiones para calcular la resistencia máxima de hincado encontradas en diversos textos de la ASCE (ASCE 1993 y 1997), el material tiene una macro y microestructura uniforme y su proceso de manufactura tiene un alto control de calidad, se decidió mantener la expresión señalada desde un inicio. De esta manera, la carga máxima de hincado para pilotes de acero estructural deberá ser igual al 90% de la carga de fluencia mínima especificada (ASCE 1997, página 13).

### 3.2. Transformación, transferencia y conservación de la energía durante el proceso de hincado

El proceso de hincado de un pilotes un concepto muy simple dentro de la ingeniería geotécnica, pues el principio básico yace en la transformación, transmisión y conservación de la energía de un cuerpo a otro, siendo la analogía más clara la del proceso de clavar un clavo dentro de una superficie resistente como, por ejemplo, madera.



*Ilustración 8: Analogía de hincado a través del proceso de martillar un clavo dentro de una tabla de madera (Imagen modificada)*

Si se toma el simple ejemplo del martillo y el clavo, en el momento que se levanta el martillo hasta una cierta altura, con intención de golpear la cabeza del clavo, transforma la energía de movimiento generada en el brazo en energía potencial en el martillo:

$$Mg * H = E_{\text{Potencial}}$$

Una vez que se alcanzó la altura deseada, se deja caer el peso del martillo (sin considerar que realmente se agrega mayor aceleración al hacer girar el peso del objeto alrededor de un eje casi inmóvil, que es la mano) sobre la cabeza del clavo. Esto representa una transformación de energía potencial en energía cinética.

$$\frac{1}{2} Mv^2 = E_{\text{cinética}}$$

La energía cinética acumulada en el martillo se transfiere hacia el clavo, lo que ocasiona que la energía se transforme en trabajo de desplazamiento, lo cual genera que el clavo penetre dentro de la superficie de madera.

El principio, entonces, es exactamente el mismo. El sistema de hincado está compuesto por un martillo, el cual se acciona desde una cierta altura y deja caer o acelera el mazo hacia el cabezal y, consecuentemente, el pilote, el cual penetra dentro del suelo una cierta profundidad, habiéndose transformado de esa manera la energía potencial en cinética y finalmente en trabajo de desplazamiento.

### **3.2.1. Conservación de la energía: pérdidas de energía en el sistema**

Sin embargo, durante las fases de transformación y transferencia de energía en el martillo y del martillo al pilote se producen pérdidas que limitan la cantidad de energía que es proporcionada por una parte del sistema. Es decir, la transferencia de energía desde el mazo del martillo no es perfecta. El concepto a entender de esto es la conservación de energía de un sistema, pues se debe cumplir que la energía entrante debe ser igual a la saliente. Dado que la energía presente en el pilote inmediatamente después del impacto es menor a la proporcionada por el martillo, se entiende que parte de ella fue disipada de alguna manera. En el caso específico de hincado de pilotes, las pérdidas de energía se pueden darse de la siguiente manera:

- Pérdida de energía por compresiones elásticas temporales: El sólido rígido no deformable solo existe como una simplificación para poder resolver la matemática de la física de manera más sencilla. En la realidad, todo objeto es deformable y tiene características mecánicas propias que le permiten responder ante una carga actuante su cuerpo. Las compresiones elásticas temporales se dan en el cabezal, pilote y el suelo y son producto de la fuerza de impacto del martillo sobre el sistema del pilote (cabezal + pilote).

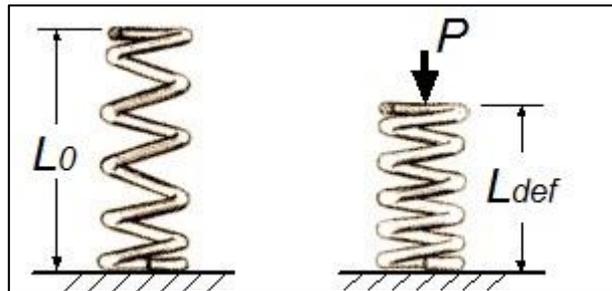


Ilustración 9: Compresión y deformación de un objeto  
(<http://www.efuda.com>)

- Pérdida de energía por el mecanismo del martillo: El martillo de hincado está compuesto por un mecanismo específico el cual contiene muchas partes que le permiten accionar el mazo. Existen 4 tipos de martillo (caída libre, vapor, hidráulico y diésel) cuyos mecanismos generan fricción durante su funcionamiento, lo que crea pérdidas. La energía nominal, al fin y al cabo, es multiplicada por un factor de eficiencia mecánica del martillo el cual marca el porcentaje de energía que realmente se proporciona del mecanismo.
- Pérdida de energía durante el impacto: El impacto no es un proceso perfecto. Dado que los objetos no son elásticos perfectos o totalmente plásticos, cierta cantidad de energía se pierde en el proceso de colisión. Cada sólido de un material determinado tiene un coeficiente de restitución “e” definido el cual determina la manera en la que el momento de impacto puede ser transferido a este, el cual varía entre cero y uno. De esta manera se puede afirmar que la cantidad de momento de impacto perdido en una colisión entre, por ejemplo, dos objetos de acero y entre dos sólidos de concreto y madera no será la misma.

De esta manera, la ecuación de conservación de energía se plantea de la siguiente manera (adaptada para el caso de hincado de pilotes):

$$E_{\text{ingreso}} = E_{\text{salida}}$$

$$E_{\text{martillo}} = W_{\text{desplazamiento}} + \text{Pérdidas}$$

$$\text{Pérdidas} = \text{Pérdida}_{\text{compresiones}} + \text{Pérdida}_{\text{mecanismo martillo}} + \text{Pérdida}_{\text{impacto}}$$

$$\text{Pérdida}_{\text{compresiones}} = C_{\text{pilote}} + C_{\text{cabezal}} + C_{\text{suelo}}$$

A continuación se describen las formas de pérdidas en el sistema descritas en las ecuaciones anteriores:

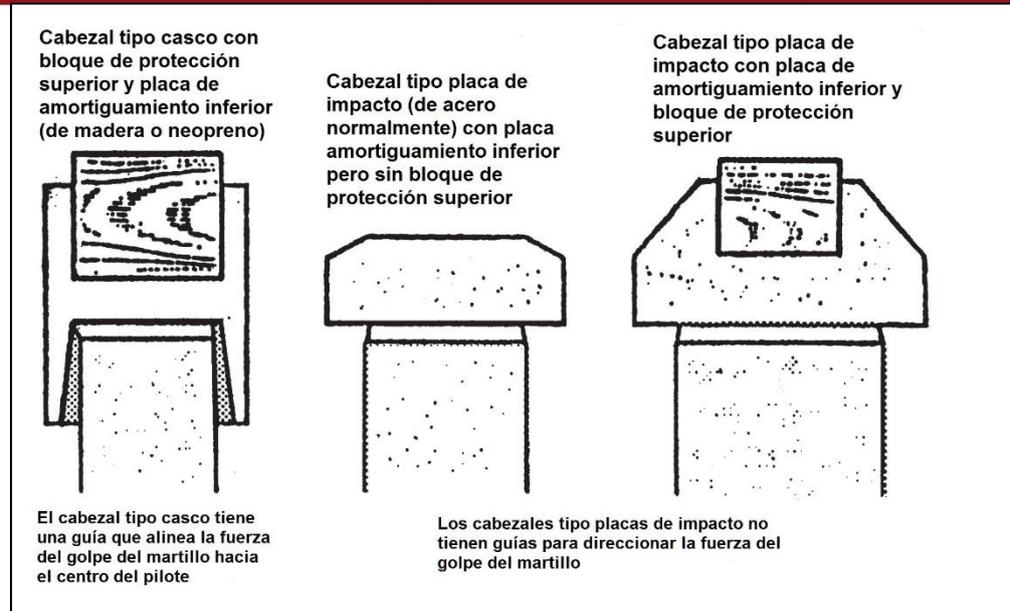
#### a. Compresiones elásticas temporales

Las compresiones elásticas se presentan en las partes que reciben la energía proveniente del martillo. Dado que el martillo representa un componente momentáneo y no activo del modelo geotécnico de la cimentación, además de estar hecho de un material extremadamente rígido, las compresiones en el martillo no son de importancia dentro del presente proceso. La real importancia yace en cuantificar las compresiones elásticas temporales del cabezal, pilote y el suelo durante el proceso de instalación (por cada golpe efectuado). Cada uno reacciona de manera distinta a las cargas actuantes, no necesariamente por su composición material, sino por su forma de transferencia de carga.

En primer lugar, se define la forma de cálculo de compresiones elásticas en el pilote. Dado que el pilote está compuesto por materiales deformables, este presenta deformaciones temporales (cuestión de segundos) durante y luego del impacto. Estas pueden ser fácilmente calculadas por la fórmula de resistencia de materiales, la cual asocia la deformación a una carga, longitud, área y módulo de elasticidad específico (Young y Freedman 2009).

$$\delta = \frac{R_H L}{EA}$$

En segundo lugar, se define la forma de cálculo de las compresiones en el cabezal del pilote, cuyo valor juega un rol importante dentro de balance energético. Las compresiones elásticas presentes en el cabezal, producto de la carga aplicada por el martillo, podrían determinarse de igual manera con la fórmula presentada en el párrafo anterior, pero los valores fueron tomados de otras fuentes para el análisis del presente proyecto. La razón por la que se realiza esta asunción es debido a la irregularidad geométrica que presenta un cabezal, el cual está compuesto por uno o más sólidos deformables con rigideces diferentes y que pueden tener formas irregulares.



*Ilustración 10: Tipos de cabezales simples (Traducción de ilustración mostrada en el manual de operaciones del American Piledriving Equipment Company: Página 2)*

En cuanto al cálculo de los valores, estos fueron calculados en base la tabla presentada en el libro de Simons y Menzies, el cual presente gráficos de comportamiento para determinar las compresiones elásticas de los cabezales en base al tipo de pilote que se está hincando y los componentes del cabezal. Las curvas describen un comportamiento lineal de las deformaciones del cabezal proporcionales al esfuerzo presente durante el hincado.

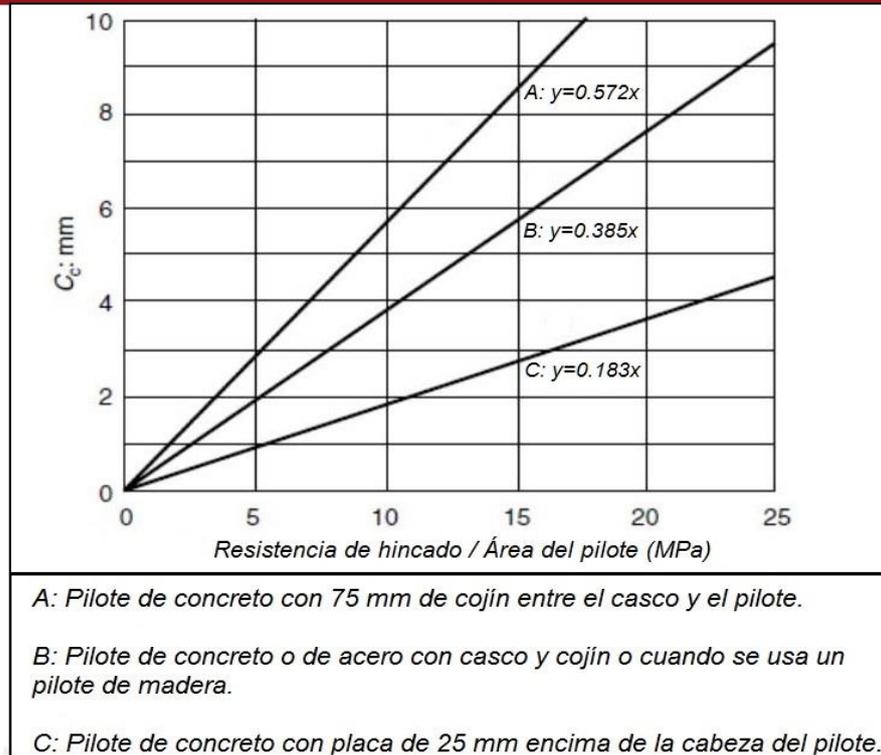


Gráfico 1: Cálculo de las compresiones elásticas temporales en el cabezal según el BSP Pocket Book de 1969 (Simons y Menzies 2000: Página 181)

El último componente del sistema de hincado que sufre compresiones elásticas temporales, y disipa energía durante el proceso de instalación, es el suelo circundante al pilote. Cuando el martillo golpea el cabezal y consecuentemente el pilote, este último penetra dentro del suelo una cierta profundidad, pero, al mismo tiempo, tiene una recuperación elástica. Esto significa que la penetración consiste en parte del desplazamiento permanente del pilote en el suelo y de compresiones elásticas en el suelo (así como en el pilote). Este concepto puede visualizarse de manera precisa en el siguiente gráfico perteneciente a una prueba de carga dinámica:

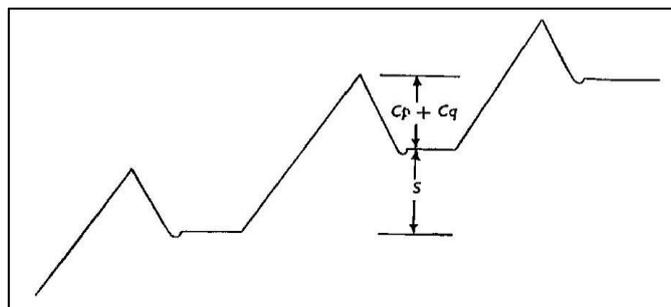


Ilustración 11: Composición del desplazamiento de un pilote luego del impacto del martillo: penetración permanente “s”, la

Los valores de la compresión elástica del suelo pueden tan solo estimarse debido a la gran variación que presentan las fórmulas en la literatura geotécnica, ya que se trata de un material heterogéneo extremadamente deformable. El suelo, uno granular como arena por ejemplo, está compuesto por un gran número de partículas que interactúan entre sí a través de la fricción cuando entran en contacto unas con otras. Es extremadamente difícil obtener un valor constante de la compresión teóricamente en base a estos parámetros debido a que nunca permanece igual, siempre existe algún tipo de variación. Lo que hay que rescatar de esta parte es que el desplazamiento del pilote, como dicho antes y como se puede apreciar en la ilustración anterior, consta de dos partes: la penetración permanente y el rebote elástico. Este último, dependiendo del tipo de suelo, tiene una parte de recuperación inmediata y otra tardía.

#### b. Pérdidas de energía por la eficiencia del mecanismo del martillo "α"

Como expuesto anteriormente, el martillo es un equipo de maquinaria pesada compuesto por diferentes partes que funcionan para accionar el peso del mazo a través de vapor, diésel o un sistema hidráulico. Es debido a todos estos componentes que el martillo pierde una fracción de la energía máxima que puede proporcionar al pilote en el momento del impacto. La pérdida de energía se genera cuando los componentes disipan energía al entrar en fricción el uno con el otro y cuando los mismos impiden que el martillo se deslice o viaje sin resistencia alguna hacia el punto de colisión.

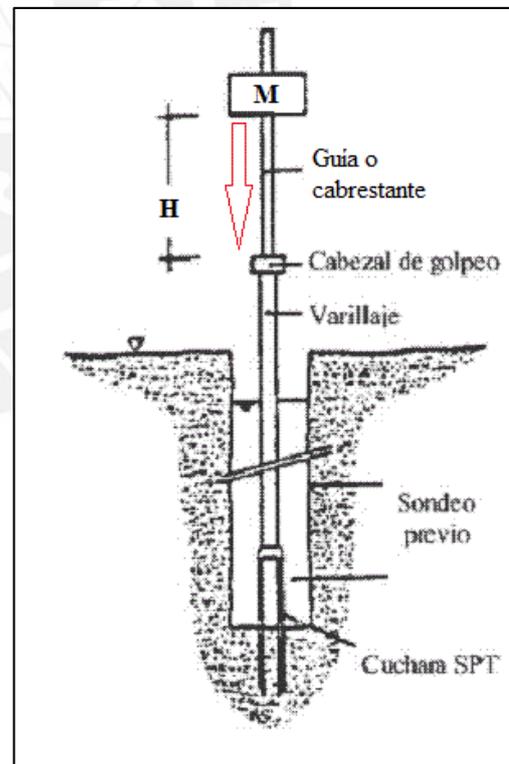


Ilustración 12: Martillo utilizado para ensayos SPT (<http://notasingenierocivil.blogspot.com>)

Por ejemplo, obsérvese el caso más simple: un martillo de gravedad accionado por cuerda, cabrestante y poleas (de pequeña escala, como lo es un equipo de ensayo SPT). En el momento que el mazo se

suelte, dado que está conectado a la guía o cabrestante, ambos generan fricción entre sí durante el deslizamiento. Además, la cuerda sigue atada al mazo cuando desciende, lo cual genera fricción con las poleas del mecanismo del martillo y contribuye en las pérdidas de la energía nominal del mazo.

Así como este ejemplo simple, los tipos de martillos tienen diferentes magnitudes de pérdida de energía durante su accionamiento, por lo que se define como eficiencia mecánica del martillo “ $\alpha$ ” la fracción de energía proveniente del mazo que logra ser transferida luego de las pérdidas por fricción y otros.

Dicho esto, las eficiencias mecánicas de los tipos más comunes de martillo se muestran en la tabla adyacente. Estos valores afectan a la energía nominal proveniente de cada martillo de la manera en que se muestra.

Tipo de martillo	Mecanismo del martillo	Eficiencia Mecánica ( $\alpha$ )
Diesel	-	1.00
Hidráulico	Acción Simple	0.85
Vapor	Acción Simple	0.75
	Acción Doble	0.65
	Acción Diferencial	0.75

*Tabla 1: Eficiencias mecánicas de los martillos de hincado utilizados en el proyecto de investigación (Diversas fuentes citadas en el capítulo 6)*

$$E_{\text{martillo}} = E_{\text{nominal}} * \alpha$$

### c. Pérdidas de energía durante el impacto: eficiencia de transferencia de energía “ $\eta$ ”

La pérdida de energía durante una colisión se da por el tipo de choque que dos sólidos o partículas tienen entre sí. Existen 3 tipos de colisiones: elástica, inelástica y totalmente inelástica.

Durante una colisión elástica, el momento lineal de las dos partes se mantiene constante. Es decir, la energía cinética total del sistema es la misma antes, durante y después del impacto. Esto normalmente se obtiene cuando chocan sólidos compuestos de materiales muy rígidos, como el acero.

Una colisión inelástica muestra una disminución de la energía cinética luego del impacto. Es decir, la energía cinética total del sistema previo a la colisión sufre pérdidas durante el impacto, lo cual genera una disminución de la energía cinética total del sistema luego de la colisión.

Por último, una colisión totalmente inelástica es aquella en la que, luego del impacto, viajan juntos en la dirección de mayor momento lineal. Es decir, debido a la naturaleza de la composición de los sólidos que participan de la colisión, los dos cuerpos viajan a una velocidad constante lo cual significa que la energía cinética inicial es equivalente a la presente luego del choque, pero con masa distinta.

Definido lo anterior, los conceptos deben trasladarse al proceso de instalación de un pilote. En dicho caso, uno de los sólidos (el pilote) está en reposo, lo cual significa que no posee energía cinética ni aportará ninguna al sistema, lo que deja solo al martillo como aportante de energía cinética.

Esto significa que, para choques elásticos, inelásticos y totalmente inelásticos, se debe definir un coeficiente de restitución que gobierne el comportamiento de la colisión, la cual se conoce en los textos de geotecnia como la constante “e”. Esta constante “e” definirá el comportamiento de la colisión y depende del tipo de material del pilote, tipo de martillo y el tipo de cabezal que se utiliza durante el hincado. Este coeficiente varía de cero a uno: para choques elásticos, el coeficiente de restitución equivale a 1, cuando se trata de choques completamente inelásticos, el coeficiente de restitución equivale a 0 y se asume que el mazo viaja con el pilote. En cambio, cuando existe una

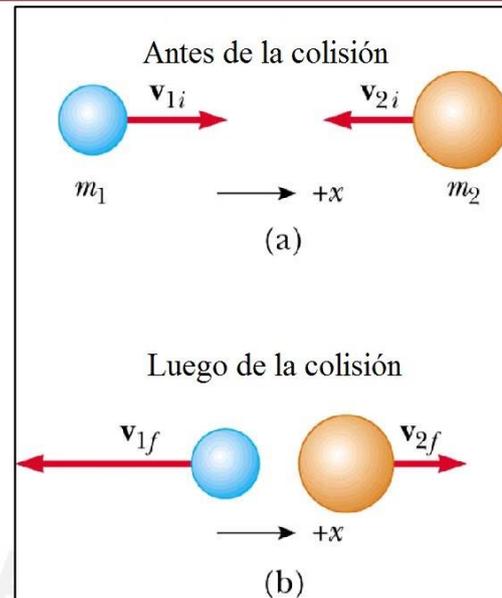


Ilustración 13: Colisión elástica (<http://www.titan.bloomfield.edu>)

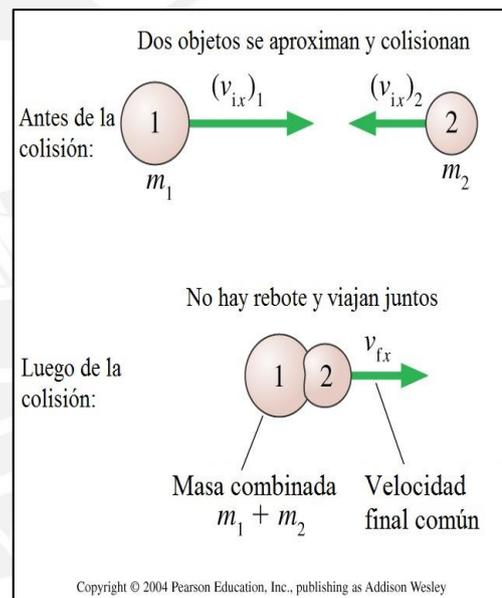


Ilustración 14: Colisión totalmente inelástica (<http://www.phy-astr.gsu.edu>)

colisión inelástica, el coeficiente de restitución varía entre 0 y 1, dependiendo de los tipos de materiales que participan en la colisión.

El coeficiente de restitución, a su vez, en conjunto con los pesos del pilote y del martillo, define la eficiencia de transmisión de energía del mazo al pilote como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{(W_M + e^2 W_P)}{(W_M + W_P)}$$

Esta fórmula define la eficiencia de transmisión de la energía del martillo al pilote tomando en cuenta si se trata de una colisión elástica, inelástica o completamente inelástica. Sin embargo, esta ecuación en particular sufre cambios en base a las magnitudes del peso del pilote y del martillo. La versión que se puede apreciar arriba es válida solo cuando el peso del pilote multiplicado por el valor del coeficiente de restitución es menor al peso del martillo. Cuando este caso no se da, es decir el peso del martillo es menor, la expresión tiene una versión alterna. A continuación se muestran ambas versiones, las cuales fueron determinantes para calcular apropiadamente el valor de la eficiencia de transmisión de energía durante el impacto:

- Cuando " $e * W_P < W_M$ ":

$$\eta = \frac{(W_M + e^2 W_P)}{(W_M + W_P)}$$

- Cuando " $e * W_P > W_M$ ":

$$\eta = \frac{(W_M + e^2 W_P)}{(W_M + W_P)} - \left[ \frac{(W_M - e * W_P)}{(W_M + W_P)} \right]^2$$

Habiendo definido todo lo anterior, se procede a definir las 10 ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes, cuyas variables se encuentran definidas en este capítulo y en la descripción de cada una de ellas.

#### 4. Ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes

La utilización de las fórmulas dinámicas de hincado de pilotes tiene su origen alrededor de inicios del siglo 19 siendo Eytelwein uno de los primeros en 1820 en poner a prueba una fórmula matemática para tratar de relacionar la resistencia generada en el suelo con la penetración y la energía proporcionada por el martillo (Davidian 1977: Página 120). Luego de él decenas de ingenieros trataron de presentar expresiones, ya sean empíricas o teóricas, que puedan mostrar con precisión la relación entre la energía suministrada por el martillo y el desplazamiento del pilote dentro del suelo. Por ejemplo, el mayor John Stanton, ingeniero militar, presentó a inicios del siglo 20 una fórmula sencilla

$$R = \frac{(W * H = E_N)}{8s}$$

en la cual se puede distinguir una relación proporcional entre la energía suministrada por el martillo “ $W*H$ ” y la resistencia generada por el suelo “ $R$ ” durante un desplazamiento del pilote dentro del suelo “ $s$ ”, con un coeficiente de 8.00 debido a un factor de seguridad. La fórmula de Stanton parte del simple concepto de que la energía del martillo se transforma en energía de traslación (R. Chellis, Cimentaciones Profundas).

$$R * s = E_N$$

Todas las fórmulas dinámicas de hincado de pilotes traen consigo el mismo concepto físico: La conservación de la energía. Pero como es de conocimiento común, la conservación de la energía no se concreta a menos que el sistema sea uno perfecto, por lo que se debe tener en cuenta que un proceso real como este implica pérdidas de energía. Como ya se explicó en el marco teórico del presente proyecto de investigación, las pérdidas consisten en compresiones elásticas sufridas en los componentes del sistema: el pilote, cabezal y martillo. Cada autor que presenta una ecuación trata de definir la relación entre la energía proporcionada y el trabajo realizado durante el hincado, tomando en cuenta las pérdidas de energía en la manera que él las vio apropiadas.

A continuación se presentan las fórmulas dinámicas de hincado de pilotes de diversos autores que fueron utilizadas durante este proyecto de investigación, con el objetivo de hallar la variación que estas tienen entre sí.

#### 4.1. Ecuación de Hiley (Civil Engineering Codes of Practice Joint Committee)

En el año 1925 Hiley propuso una ecuación que fue considerada la más completa para su época, ya que tomaba en cuenta ciertas pérdidas energéticas que otras fórmulas no lo habían hecho hasta el momento (ASCE, Pile Driving Formulas – Past and Present) lo cual tuvo una gran acogida en los países de la mancomunidad británica (Inglaterra, Australia, Canadá, entre otros). Esta ecuación es considerada, en este proyecto de investigación y dada la extensa información encontrada acerca de ella, la más exacta y completa de todas las expresiones propuestas debido a que incluye las compresiones elásticas del pilote, suelo y cabezal de manera separada. Las compresiones en el pilote se determinaron mediante la fórmula de deformaciones de resistencia de materiales mientras que las del suelo y cabezal se determinaron en base a valores en la literatura investigada (Simons y Menzies 2000: Páginas 181-183). Distintos autores indican que la ecuación se debe utilizar con un factor de seguridad de 2.00 (Civil Engineering Codes of Practices Joint Committee 1954: Página 3), por lo que se incluye en la expresión.

La fórmula incluye los siguientes componentes: eficiencia mecánica del martillo ( $\alpha$ ), eficiencia de transmisión de energía ( $\eta$ ), energía nominal proporcionada por el martillo ( $E_N$ ), resistencia durante el hincado ( $R_H$ ), compresiones temporales elásticas ( $C_P$ ,  $C_C$  y  $C_S$ ) y la penetración final por golpe ( $s$ ).

La ecuación se extrajo del libro de un artículo del Comité de Código de Prácticas de Ingeniería Civil y cuyas variables pueden utilizarse en unidades métricas e imperiales.

$$\frac{R_{m\acute{a}x}}{F.S.} = \frac{R_{m\acute{a}x}}{2.00} = R_H = \frac{\alpha * E_N * \eta}{\left[ s + \frac{1}{2} (C_P + C_S + C_C) \right]}$$

El valor de la compresión elástica del pilote puede ser determinado a través de la ecuación de deformación de cuerpos deformables.

$$\delta = \frac{R_H L}{EA}$$

Por otro lado, los valores de las compresiones elásticas en el suelo y el cabezal pueden ser determinados a través de los siguientes gráficos extraídos del libro de Simons y Menzies

(Simons y Menzies 2000: Páginas 181-183), los cuales utilizan unidades del sistema internacional de unidades.

**a. Compresiones elásticas temporales en el cabezal:**

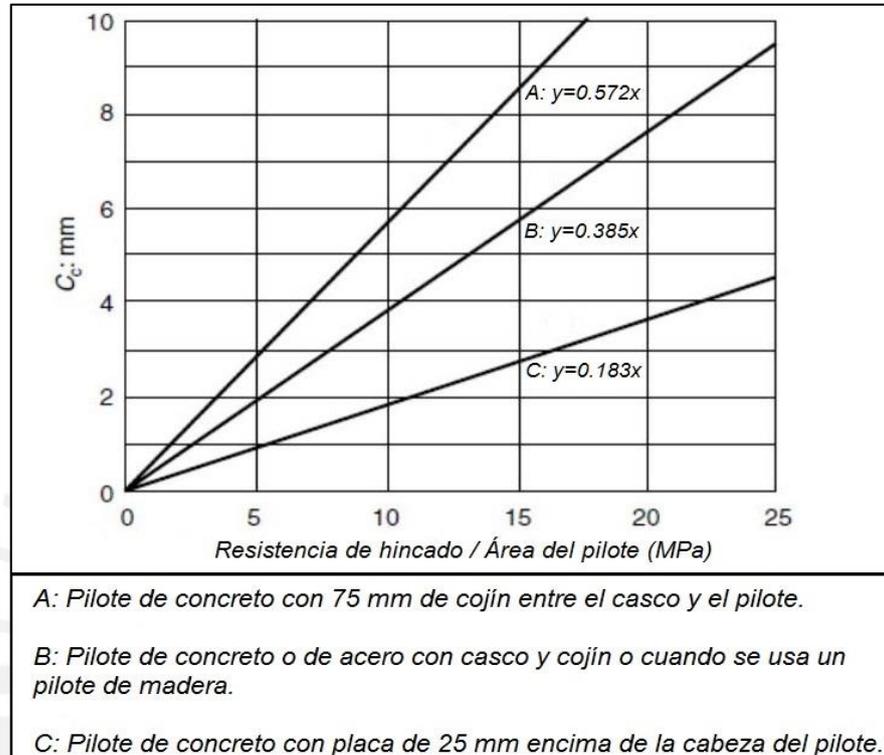


Gráfico 2: Cálculo de las compresiones elásticas temporales en el cabezal según el BSP Pocket Book de 1969 (Simons y Menzies 2000: Página 181)

**b. Compresiones elásticas temporales en el suelo:**

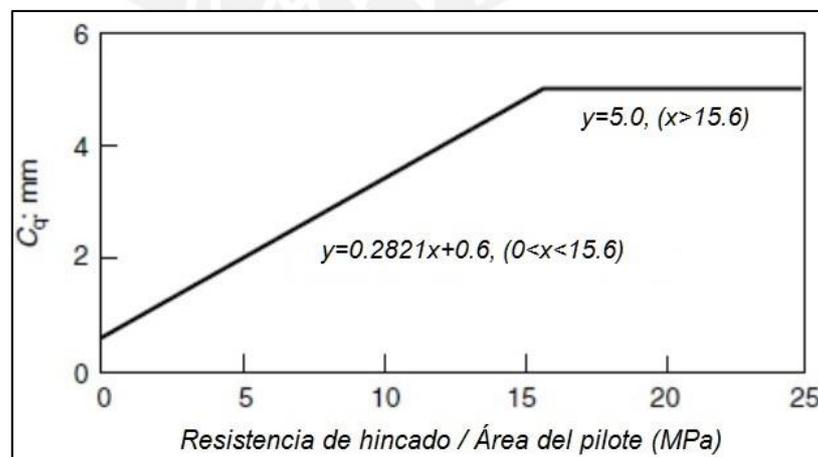


Gráfico 3: Cálculo de las compresiones elásticas temporales en el suelo según el BSP Pocket Book de 1969 (Simons y Menzies 2000: Página 183)

#### 4.2. Ecuación del Código de Edificaciones Canadiense (Afolayan y Opeyemi)

La fórmula del Código de Construcción Canadiense es una variación de la fórmula de Hiley, muy similar a ella en su estructura. En lugar de incluir compresiones separadas para el pilote, suelo y cabezal, la ecuación incluye una expresión empírica para el valor de las compresiones del sistema entero. Según Afolayan y Opeyemi, la ecuación debe aplicarse con un factor de seguridad de 3.00 (Afolayan y Opeyemi 2010: Página 49).

La fórmula incluye los siguientes componentes: eficiencia mecánica del martillo ( $\alpha$ ), eficiencia de transmisión de energía ( $\eta$ ), energía nominal proporcionada por el martillo ( $E_N$ ), resistencia durante el hincado ( $R_H$ ), la longitud al centro de resistencia del pilote ( $L$ ), un factor de compresiones temporales elásticas ( $C$ ) y la penetración final por golpe ( $s$ ).

Las unidades de las variables pueden utilizarse con el sistema internacional (kilo-newtons y metros específicamente).

$$\frac{R_{m\acute{a}x}}{F.S.} = \frac{R_{m\acute{a}x}}{3.00} = R_H = \left[ \frac{\alpha * E_N}{s + \left(\frac{3R_H}{2A}\right) C} \right] \eta$$

$$C = \left( \frac{L}{E} + 0.0001 \right)$$

#### 4.3. Ecuación del Engineering News Record (Poulos y Davis)

La ecuación del Engineering News Record, creada en 1888 (Davidian 1977: página 126), muestra una simple relación entre la energía suministrada y el trabajo realizado durante el hincado. A manera de simplificar los cálculos, el creador de la fórmula determinó que la inclusión de un valor empírico para determinar las compresiones, dado un tipo de martillo, era la solución más simple y adecuada. La fórmula utiliza los valores de 1.0, 0.1 y 0.1( $W_p/W_m$ ), en pulgadas, para hallar las compresiones elásticas globales del sistema cuando se usa un martillo de caída libre (o hidráulicos) y de vapor (acción simple, doble y diferencial), en combinación con pilotes de peso regular y muy pesados, respectivamente (Poulos y Davis: Página 55). Es importante resaltar que la fórmula fue realizada en base a los resultados obtenidos del hincado de pilotes de madera. De esta manera, la ecuación solo

puede utilizarse para pilotes de madera y, como se mencionó anteriormente, para martillos de caída libre (o hidráulicos) y de vapor.

Se incluyen los siguientes componentes: eficiencia mecánica del martillo ( $\alpha$ ), energía nominal proporcionada por el martillo ( $E_N$ ), resistencia durante el hincado ( $R_H$ ), compresiones temporales elásticas en la forma de un coeficiente y la penetración final por golpe ( $s$ ). Como se puede apreciar, la eficiencia de transmisión de energía no figura como variable ya que es asumida como 1.0, es decir, la eficiencia es del 100%. Por ende, el coeficiente de restitución para esta ecuación es igual a 1.0 para poder cumplir con el valor de la eficiencia de impacto.

La ecuación se encuentra en y deber ser utilizada únicamente con unidades imperiales y se utiliza un factor de seguridad de 6.00 (Poulos y Davis: Página 57).

$$\frac{R_{m\acute{a}x}}{F.S.} = \frac{R_{m\acute{a}x}}{6.00} = R_H = \frac{E_N * \alpha}{s + C}$$

**C = 1.0 pulgadas, para martillos hidráulicos de caída libre**

**C = 0.1 pulgadas, para martillos a vapor de acción simple, doble y diferencial**

**C = 0.1(W<sub>p</sub>/W<sub>m</sub>) pulgadas, para martillos a vapor en combinación con pilotes muy pesados**

#### 4.4. Ecuación de Delmag (J. Zegarra)

La ecuación de Delmag fue desarrollada por el fabricante de martillos Delmag (ZEGARRA 2013: diapositivas) y solamente puede ser utilizada por martillos del mismo. La particularidad de esta fórmula, tan utilizada en Europa y Estados Unidos, es que tiene una constante de elasticidad entre el pilote y el suelo, que incluye las pérdidas de energía que se disipan en el suelo durante el hincado. A parte de esta consideración, la ecuación no incluye expresiones para las compresiones elásticas temporales del pilote o cabezal. Esto indica que, para el autor, estas compresiones no tienen la relevancia suficiente para merecer formar parte de la ecuación. Además, no incluye la variable “ $\alpha$ ” en la ecuación, lo cual da a entender que el autor ha considerado que la eficiencia mecánica del martillo durante el hincado es igual a 1.0, magnitud utilizada comúnmente para martillos diésel en los textos de ingeniería geotécnica.

La fórmula incluye los siguientes componentes: eficiencia de transmisión de energía ( $\eta$ ) desdoblada y con un coeficiente de restitución igual a cero, energía nominal proporcionada por el martillo ( $E_N$ ), resistencia durante el hincado ( $R_H$ ), una constante de elasticidad entre el pilote y el suelo ( $c$ ), la longitud total del pilote ( $L$ ) y la penetración final por golpe ( $s$ ). Las variables se encuentran en unidades métricas y, según los textos investigados, esta ecuación debe utilizarse con un factor de seguridad de 2.50.

$$\frac{R_{m\acute{a}x}}{F.S.} = \frac{R_{m\acute{a}x}}{2.50} = R_H = \left[ \frac{E_N}{(cL + s)} \left( \frac{W_M}{W_M + W_P} \right) \right]$$

$c = 0.6$  mm/m, para pilotes de madera

$c = 0.3$  mm/m, para pilotes de concreto armado y acero

#### 4.5. Ecuación de Bénabencq (Z. Davidian)

La fórmula de Bénabencq, presentada en 1911 (DAVIDIAN 1977: página 124), asume una eficiencia al 100% del mecanismo del martillo, así como un choque perfectamente elástico. La ecuación incluye los siguientes componentes: la energía nominal proporcionada por el martillo ( $E_N$ ), resistencia durante el hincado ( $R_H$ ) y la penetración final por golpe ( $s$ ).

Los factores de seguridad utilizados varían entre 4.00 y 8.00 (Davidian 1977: Página 124), por lo que, en este caso, se utilizará un F.S. igual a 6.00. La ecuación proviene del libro de Z. Davidian y puede utilizarse en unidades imperiales y métricas.

$$\frac{R_{m\acute{a}x}}{F.S.} = \frac{R_{m\acute{a}x}}{6.0} = R_H = \left( \frac{E_N}{2s} \right)$$

#### 4.6. Ecuación de Eytelwein (Z. Davidian)

La fórmula de Eytelwein fue utilizada por primera vez en 1820 (DAVIDIAN 1977: página 120) y considera un choque perfectamente inelástico, el cual asume que el martillo y el pilote viajan juntos durante la penetración del último en el suelo. Esto significa que el

coeficiente de restitución es igual a cero. Paralelamente, se asume que la eficiencia mecánica es igual a 1.00 y que las compresiones elásticas temporales en el terreno son despreciables.

A manera de ilustrar mejor este concepto, se presenta la siguiente imagen:

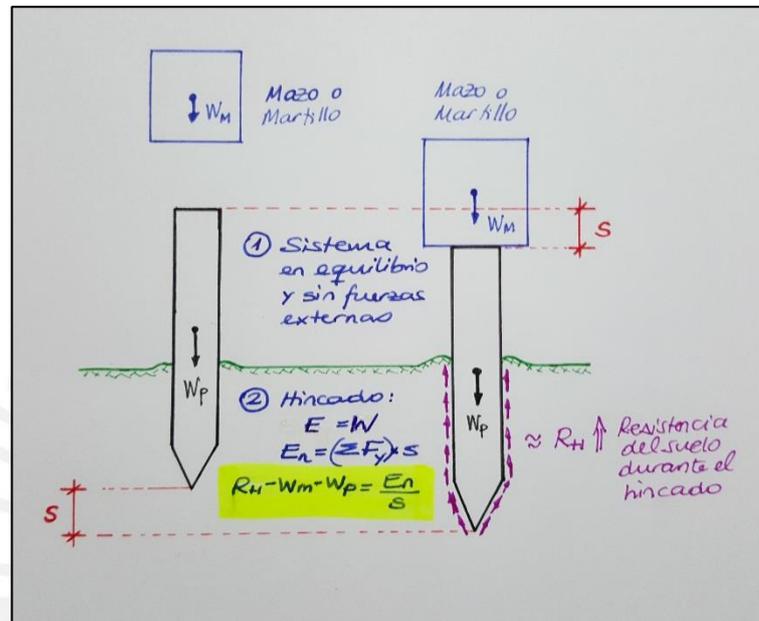


Ilustración 15: Proceso de hincado adaptado a la ecuación de Eytelwein. Los pesos del martillo y pilote se consideran dentro del análisis de hincado, por lo que deben incluirse dentro de la sumatoria de fuerzas ejercida durante el desplazamiento del pilote (Fuente propia)

Se podría argumentar que esta ecuación, dado a que su origen data de hace casi dos siglos, quedaría obsoleta en comparación con las demás ecuaciones. No obstante, la literatura geotécnica investigada y utilizada para esta investigación muestra repetidamente esta fórmula, por lo que se ha considerado importante incluirla dentro del análisis. Además, resulta de interés de este proyecto evaluar la variación entre ecuaciones más recientes y esta.

La fórmula incluye los siguientes componentes: eficiencia de transmisión de energía ( $\eta$ ) desdoblada y con “e” igual a cero, energía nominal proporcionada por el martillo ( $E_N$ ), resistencia durante el hincado ( $R_H$ ), los pesos del martillo y pilote ( $W_M$  y  $W_P$ ) y la penetración final por golpe ( $s$ ). Según Davidian, la ecuación se utiliza con un factor de seguridad de 6 a 12, pero Poulos y Chellis sugieren un valor de 6.00 para la fórmula. Dado estos valores, se decidió utilizar un F.S. de 6.0 (Poulos y Davis: Página 57). La ecuación proviene del libro de Z. Davidian y puede utilizarse en unidades métricas e imperiales.

$$\frac{R_{m\acute{a}x}}{F.S.} = \frac{R_{m\acute{a}x}}{6.0} = R_H = \frac{E_N}{s} \left( \frac{W_M}{W_M + W_P} \right) + W_M + W_P$$

#### 4.7. Ecuación de Goodrich (Z. Davidian)

La fórmula de hincado de Goodrich, creada en 1901, toma en cuenta la mayoría de fenómenos que ocurren durante el proceso de instalación de un pilote (Davidian 1977: página 124), lo cual resulta en una ecuación extensa, la cual es depurada. La particularidad de esta ecuación es el hecho que solo puede ser aplicada con pilotes de madera y martillos de caída libre (o hidráulicos) (Chellis 1971, página 655), lo cual delimita mucho su uso, pero ha sido considerada de igualmente dado a que se repite mucho en los textos investigados. Usualmente, la ecuación se utiliza con un factor de seguridad de 3.00 (Chellis 1971: Página 655).

Luego de la simplificación de los términos, la ecuación incluye los siguientes componentes: energía nominal proporcionada por el martillo ( $E_N$ ), resistencia durante el hincado ( $R_H$ ) y la penetración final por golpe ( $s$ ). La ecuación proviene del libro de Zaven Davidian y puede utilizarse en unidades métricas e imperiales.

$$R_H = \frac{1}{C_o} \left( \frac{EA}{L} \right) s + \frac{EA}{sL} \sqrt{s^2 + \frac{1.15s * L * E_N}{EA} (B - Z)}$$

Luego de reemplazar Z por 0.02 y B por 0.5, la ecuación queda simplificada:

$$\frac{R_{m\acute{a}x}}{F.S.} = \frac{R_{m\acute{a}x}}{3.0} = R_H = 0.276 \frac{E_N}{s}$$

#### 4.8. Ecuación de Gates (Poulos y Davis)

La fórmula Gates considera un impacto perfectamente elástico (“e” igual a 1) y un modelo teórico de instalación en el cual la punta del pilote se encuentra empotrada en el suelo. Esto

permite que el centro de resistencia de la fricción ejercida sobre el pilote por el suelo se encuentre a la mitad del pilote. Además, tiene diferentes expresiones cuando se usan pilotes de madera, acero y concreto armado. Según Poulos y Davis, la ecuación se utiliza con un factor de seguridad de 3.00 (Poulos y Davis: Página 57).

La ecuación incluye solo la energía nominal proporcionada por el martillo ( $E_N$ ), la eficiencia mecánica del martillo ( $\alpha$ ) y la penetración final por golpe ( $s$ ). Las variables de la ecuación se encuentran en unidades métricas e imperiales ( $E_N$  en toneladas por pulgada y  $s$  en pulgadas).

A continuación figuran las ecuaciones para el hincado de pilotes de madera, acero y concreto armado, respectivamente en orden de aparición.

$$\frac{R_{m\acute{a}x}}{F.S.} = \frac{R_{m\acute{a}x}}{3.0} = R_H = (7.2\sqrt{\alpha * E_N}) \left( \log_{10} \frac{10}{s} \right) - 17$$

$$\frac{R_{m\acute{a}x}}{F.S.} = \frac{R_{m\acute{a}x}}{3.0} = R_H = (13.0\sqrt{\alpha * E_N}) \left( \log_{10} \frac{10}{s} \right) - 83$$

$$\frac{R_{m\acute{a}x}}{F.S.} = \frac{R_{m\acute{a}x}}{3.0} = R_H = (9.0\sqrt{\alpha * E_N}) \left( \log_{10} \frac{10}{s} \right) - 27$$

#### 4.9. Ecuación del Código Unificado de Edificaciones de la Costa del Pacífico (Afolayan and Opeyemi)

La fórmula de hincado del CUECP asume que las pérdidas por compresiones elásticas en el cabezal y el suelo se limitan únicamente a la compresión elástica del pilote. Según Afolayan y Opeyemi, la fórmula se debe aplicar con un factor de seguridad de 4.00 (Afolayan y Opeyemi 2010, Página 50).

La ecuación incluye los siguientes componentes: eficiencia de transmisión de energía ( $\eta$ ) modificada por un factor “K” en lugar de “e”, energía nominal proporcionada por el martillo ( $E_N$ ), resistencia durante el hincado ( $R_H$ ), los pesos del martillo y pilote ( $W_M$  y  $W_P$ ), el módulo de elasticidad ( $E$ ), el área neta del pilote ( $A$ ), la longitud al centro de resistencia del pilote ( $L$ ) y la penetración por golpe ( $s$ ), así como una constante “K” que modifica la eficiencia de transmisión de energía. Esta constante “K” se reemplaza por 0.25 cuando se

utilizan pilotes de acero y por 0.10 cuando se utilizan otros tipos de pilotes (Afolayan y Opeyemi 2010: Página 51).

Las variables se encuentran en el sistema internacional de unidades (kilo-newtons y metros específicamente).

$$\frac{R_{m\acute{a}x}}{F.S.} = \frac{R_{m\acute{a}x}}{4.0} = R_H = \frac{\alpha E_N \left( \frac{W_M + KW_P}{W_M + W_P} \right)}{\left( s + \left( \frac{R_H L}{EA} \right) \right)}$$

**K = 0.25, para pilotes de acero**

**K = 0.10, para pilotes de otros tipos**

#### 4.10. Ecuación de Janbu (Simons y Menzies)

La fórmula de Janbu fue propuesta en 1953 con el objetivo de crear una fórmula que pueda ser aplicada para cualquier martillo y pilote. Según Simons y Menzies, “ $\eta$ ” incorpora una serie de condiciones para su cálculo y se presenta como un término que define la calidad de hincado de la siguiente manera: condiciones buenas, regulares y malas. Los valores otorgados para estas condiciones de “ $\eta$ ” son 0.70, 0.55 y 0.40 respectivamente (Simons y Menzies 2000: Página 179). Para efectos de este trabajo de investigación, el cálculo de “ $\eta$ ” se realizará según la fórmula propuesta en el acápite de Marco Teórico de este documento, dado que este proyecto no contempla condiciones de hincado adicionales a las que se presentan. Además, este valor es modificado por un factor dependiente de la deformación del pilote. Por otro lado, Simons y Menzies recomiendan que el factor de seguridad que se debe aplicar para el uso de esta fórmula es de 3.00 (Simons y Menzies 2000: Página 181).

La ecuación incluye los siguientes componentes: eficiencia mecánica del martillo ( $\alpha$ ), energía nominal proporcionada por el martillo ( $E_N$ ), resistencia durante el hincado ( $R_H$ ), un factor de eficiencia de impacto que depende de los pesos del martillo y pilote ( $W_M$  y  $W_P$ ), el módulo de elasticidad ( $E$ ), el área neta del pilote ( $A$ ), la longitud al centro de resistencia del pilote ( $L$ ) y la penetración por golpe ( $s$ ).

Dado que esta fórmula es polinómica y contiene muchas variables fijas, resultó de utilidad agrupar ciertos términos en variables artificiales para facilitar los cálculos. De esta manera se definieron las variables “ $F_1$ ” y “ $F_2$ ”, las cuales se presentan líneas abajo.

Las variables se encuentran en el sistema métrico de unidades.

$$\frac{R_{m\acute{a}x}}{F.S.} = \frac{R_{m\acute{a}x}}{3.0} = R_H = \frac{\alpha E_N \eta}{K_U s}$$

$$F_1 = \frac{\alpha E_N \eta * L}{EA * C_d}$$

$$F_2 = \frac{\alpha E_N \eta}{R_H * C_d}$$

$$s = \frac{F_2}{1 + \sqrt{1 + \frac{F_1}{s^2}}}$$

$$K_U = C_d \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{(\alpha E_N \eta L)}{EA * C_d s^2}} \right]$$

$$C_d = 0.75 + 0.15 \frac{W_p}{W_M}$$

Existen muchas otras fórmulas más dentro de la infinidad de artículos y literatura geotécnica halladas e investigadas para este proyecto de investigación las cuales no fueron presentadas por igual cantidad de razones. Una de ellas es por el hecho del uso que tienen estas ecuaciones en la actualidad. Muchas de las fórmulas existentes en la bibliografía datan hasta más de un siglo en el pasado y han sido reemplazadas por versiones mejores y más precisas; o simplemente probaron no ser apropiadas para la ingeniería geotécnica debido a inconsistencias en los resultados obtenidos durante la práctica. Este es el caso de la ecuación de la marina Navy-McKay. La fórmula se encuentra presente en muchos textos, pero se hace mención de que la marina estadounidense discontinuó su uso debido a que hoy en día existen mejores métodos para determinar los esfuerzos de hincado y la penetración por golpe o número de golpes.

Otra razón por la cual, por ejemplo, las ecuaciones de Terzaghi, Wellington, Kafka, Sanders, Merriman, entre otros, no fueron presentadas, fue debido a que presentaban muchas similitudes en su forma matemática con respecto a las 10 fórmulas presentadas en este proyecto de investigación.



## 5. Metodología de investigación e hipótesis del proyecto

Como se pudo apreciar en los capítulos anteriores, la investigación realizada para poder elaborar el presente trabajo fue extensa y detallada para poder plantear los parámetros base para el análisis de las ecuaciones. Cada una de las características de los pilotes y martillos fueron extraídos de catálogos y libros de diferentes autores y fueron tomados solo aquellos valores que estaban presentes en la mayoría de los textos consultados. Fue de esta manera que, para determinar la metodología de investigación, se utilizaron los siguientes métodos científicos:

- Método dialéctico: *“Busca reproducir de forma teórica los aspectos y relaciones de la realidad objetiva, de manera que, a través del conocimiento del fenómeno, se pueda llegar a su esencia, a las leyes rigen su origen (BERNAL et ál 2013: Página 38)”*. El proceso de hincado, como se indicó en el capítulo 3 en la analogía del clavo y martillo, es en sí un concepto sencillo a grandes rasgos pero influyen en él muchas variables con respecto al pilote, transferencia de energía y el martillo. Es por ello que fue necesario investigar a profundidad la inmensidad de opiniones técnicas y catálogos en los libros de geotecnia para poder conocer a detalle el proceso de instalación y sus componentes.
- Método analítico-sintético: *“Busca desmembrar y analizar cada componente del problema para luego unificar y analizar el comportamiento de los componentes en conjunto (BERNAL et ál 2013: Página 39)”*. Una vez finalizadas las actividades relacionadas con el método de investigación dialéctica, los parámetros necesarios a definir se analizaron y se agruparon aquellos correspondientes a cada una de las ecuaciones. Es por ello que el método de investigación analítica-sintética fue tan importante en la fase de análisis: los parámetros y características de los pilotes y martillos elegidas (energía nominal del martillo, sección, material, resistencia, longitud, deformación, etc.) tienen un comportamiento individual dentro del grupo de variables de una ecuación que afecta el resultado final en conjunto con las demás incógnitas.

En base a estos métodos de científicos se propuso la siguiente metodología de investigación, basada en la de Mario Bunge (1990):

1. Planteamiento del proceso general de hincado de pilotes
2. Presentación de las leyes y teoremas físicos que gobiernan el proceso de hincado

3. Presentación de los métodos dinámicos (ecuaciones dinámicas de hincado) que serán estudiados
4. Definición de los parámetros físicos y mecánicos de los martillos y pilotes que integrarán el repertorio casuístico del proyecto
5. Análisis energético de los métodos dinámicos de hincado con los parámetros elegidos
6. Evaluación comparativa de los resultados obtenidos
7. Determinación de los límites de cada fórmula y la variabilidad entre ellas

En base a lo dicho anteriormente, se puede definir la hipótesis que el presente proyecto de investigación intenta probar:

***“Existen rangos de parámetros que definen el alcance de cada ecuación dinámica de hincado de pilotes, de manera que puedan ser utilizadas de manera confiable en la estimación de la penetración de un pilote bajo ciertas características de hincado”***

La hipótesis busca obtener el rango de parámetros físicos y mecánicos de los pilotes y martillos que pueden ser utilizados en cada ecuación sin que se obtengan valores fuera de un rango de confianza establecido en esta investigación.

A continuación se presentan los parámetros de los pilotes y martillos que fueron elegidos para el análisis de las 10 ecuaciones de hincado.

## 6. Parámetros para la evaluación de la ecuaciones dinámicas de hincado

---

Como ya se mencionó en acápite anteriores, el propósito de este proyecto de investigación es determinar las variaciones que se obtienen al usar las fórmulas dinámicas de hincado disponibles en la literatura académica y profesional. Para alcanzar este objetivo, parte de la labor realizada consistió en definir los parámetros necesarios para poder evaluar adecuadamente las ecuaciones presentadas en el capítulo 4. Las ecuaciones de Hiley, Engineering News, Código de Edificaciones de Canadá, Janbu, Delmag, entre otras, se encuentran definidas por diversas variables cuyas propiedades afectan a cada una de las ecuaciones en diferentes proporciones; ya sea la sección del pilote, su longitud, tipo de material, la energía transmitida por el martillo, etc. Para propósitos de esta investigación, se establecieron los siguientes parámetros de evaluación para el análisis de las fórmulas:

- **Tipo de material del pilote:** La ingeniería de cimentaciones tiene la ventaja de disponer de diversos materiales para cumplir un fin específico. En este caso, los pilotes utilizados para el análisis son de concreto armado pretensado, acero estructural y madera latifoliada o tropical peruana.
- **Resistencias últimas:** Está claro que cada material tiene propiedades mecánicas en diferentes grados o resistencias. Dada la amplia gama de opciones que existen en el mercado, se optó por definir 3 niveles de resistencia para cada material (baja, intermedia y alta).
- **Longitud del pilote:** Se consideraron 3 longitudes de pilotes para cada tipo de material debido a la influencia que tiene en el cálculo de las deformaciones.
- **Tipo de sección:** Se presentaron 2 variantes de sección de pilote para cada material estudiado. Para los pilotes pretensados de concreto armado se consideraron secciones tubulares y hexagonales huecas. Para los aquellos de acero estructural se consideraron secciones en “H” y tubulares y, por último, para las secciones para los pilotes de madera se consideraron formas circulares y rectangulares llenas.

- **Tamaño de sección:** Una vez definidas las variantes de sección para cada pilote, se establecieron tamaños representativos que engloben pilotes de sección pequeña, regular y grande.
- **Tipo de martillo:** Dado que el mercado ofrece diferentes tipos de martillos para la hincada de pilotes en proyectos de fundación, se presentaron 4 tipos de martillo con mecanismos de acción diferentes (los cuales se describirán a lo largo de este capítulo): diésel, hidráulico de caída libre y a vapor (o presión de aire).
- **Tipo de cabezal utilizado:** El cabezal, como mencionado anteriormente es un sistema compuesto por varias partes que permiten la transferencia de energía del martillo al pilote de la manera más eficiente y segura posible. Para efectos de este proyecto, se ha asumido un ensamblaje simple consistente de 3 partes: cojín de neopreno para el martillo, casco y cojín de neopreno para el pilote.

A continuación se presentan las especificaciones técnicas de los parámetros de los pilotes y martillos elegidos para el análisis. Cabe mencionar que las características seleccionadas deben ser combinadas entre sí para armar un repertorio casuístico significativo: Al considerar un número “ $n$ ” de situaciones, las cuales quieren combinarse con un número “ $m$ ” de escenarios distintos para determinar el número de combinaciones posibles dadas las dos características presentadas, el número de casos equivaldría a “ $m \times n$ ”. Si se quieren combinar esos casos con otro número de situaciones, simplemente se multiplica de nuevo (BAYES 2011: diapositivas).

### 6.1. Pilotes

Como ya se mencionó líneas arriba, gran parte de este proyecto de investigación consistió encontrar un número adecuado de pilotes que puedan abarcar la mayor cantidad de características posibles para poder evaluar de manera adecuada las ecuaciones dinámicas de hincado propuestas. Es por ello que se eligieron los 3 tipos de materiales más comúnmente utilizados como elementos de pilotes en el campo de la ingeniería: madera, acero y concreto armado. En el Perú y en el mundo entero, el acero y concreto son los materiales preferidos para desarrollar las soluciones de cimentaciones profundas, pues tienen una durabilidad elevada (acondicionado a un buen tratamiento previo y buenos hábitos constructivos) y resisten cargas grandes. En cuanto a la madera, esta suele ser utilizada como elemento de cimentación profunda cuando la estructura que se construirá no tiene mucha importancia o es temporal, ya que la madera resiste cargas menores que el

acero y concreto y goza de menor durabilidad si no ha recibido un tratamiento previo adecuado. Sin embargo, si la madera es expuesta a un tratamiento de durabilidad adecuado, su tiempo de vida puede extenderse de manera significativa.

A continuación se presentan los parámetros que fueron tomados en cuenta para cada material durante el desarrollo de esta investigación.

### 6.1.1. Pilotes de madera latifoliada (tropical) peruana

Unas de las consideraciones para la selección de los parámetros para la construcción de los casos del análisis fue tomar en cuenta la disponibilidad de aquel material en el Perú. El tipo de madera que uno encuentra en una zona específica del mundo depende del tipo de suelo y, sobre todo, del clima que gobierna la zona. De esta manera, resulta ilógico considerar madera proveniente de árboles como el roble, arce (maple) o nogal que son nativos de países como EEUU y no utilizar madera nativa a nuestro país. Especialmente cuando se sabe que el uso de pilotes de madera es dirigido únicamente para cimentaciones de estructuras de muy poca importancia sísmica o temporales. Por este motivo es que el presente proyecto incluye en el análisis pilotes de maderas del grupo andino clasificadas por la Junta del Acuerdo de Cartagena. De todos los tipos de madera identificados en el manual de diseño, se extrajeron aquellas que son nativas al Perú:

Nombre Común	Nombre Científico	País	Densidad Básica (gr/cm <sup>3</sup> )	Clasificación Estructural
Estoraque	<i>Myroxylon peruiferum</i>	Perú	0.78	A
Palo sangre negro	<i>Pterocarpus</i> sp.	Perú	0.72	A
Palo sangre amarillo	<i>Pterocarpus</i> sp.	Perú	0.71	A
Chimicua	<i>Pseudolmedia laevis</i>	Perú	0.70	B
Manchinga	<i>Brosimum uleanum</i>	Perú	0.68	B
Pumaquiro	<i>Aspidosperma macrocarp</i>	Perú	0.67	A
Almendro	<i>Caryocar coccineum</i>	Perú	0.65	B
Huayruro	<i>Ormosia coccinea</i>	Perú	0.60	B
Copaiba	<i>Copaifera officinalis</i>	Perú	0.60	C
Cachimbo	<i>Cariniana domesticaca</i>	Perú	0.59	B
Huimba	<i>Ceiba samauma</i>	Perú	0.56	B
Casho moena	<i>Ocotes</i> sp.	Perú	0.53	C
Diablo fuerte	<i>Podocarpus</i> sp.	Perú	0.53	C
Panguana	<i>Brosimum utile</i>	Perú	0.48	C
Tornillo	<i>Cedrelinga catenaeformis</i>	Perú	0.44	C
Catahua amarilla	<i>Hura crepitans</i>	Perú	0.41	C
Moena negra	<i>Nectandra</i> sp.	Perú	0.41	C
Ucshaquiro blanco	<i>Sclerolobium</i> sp.	Perú	0.38	X
Marupa	<i>Simarouba amara</i>	Perú	0.36	X
Maquizapa ñagecha	<i>Apeiba aspera</i>	Perú	0.30	X

Tabla 2: Especies de madera latifoliada (tropical) nativas del Perú clasificadas según capacidad estructural (JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA 1984, Manual de diseño para maderas del grupo andino)

Una vez identificadas las especies peruanas de madera latifoliada, para propósitos de este proyecto de investigación, estas fueron ordenadas según su densidad básica, la cual determina su módulo de elasticidad y resistencia última en compresión paralela al grano. Cada tipo de madera tiene una densidad básica que la caracteriza y se clasifican como tipos estructurales de madera en base a los rangos mostrados a continuación.

Categoría de Madera Estructural	Densidad Mínima (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad Máxima (gr/cm <sup>3</sup> )
A	0.71	0.90
B	0.56	0.70
C	0.40	0.55
X	-	0.40

Tabla 3: Grupos de madera estructural en base a rangos de densidad básica (JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA 1984, Manual de diseño para maderas del grupo andino)

Descripción de las categorías de madera estructural
A: Maderas de resistencia y densidades mayores. Se usan mayormente para vigas, columnas y pilotes.
B: Maderas de resistencia y densidades intermedias. Se usan para vigas y columnas de dimensiones menores.
C: Maderas de resistencia y densidades bajas. Se usan para elementos estructurales pequeños y de poca importancia.
X: Maderas de resistencia y densidades muy bajas (no clasifican como madera estructural).

Tabla 4: Descripción de las categorías de madera estructural (JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA 1984, Manual de diseño para maderas del grupo andino)

En base a la clasificación realizada, se eligió una especie de madera por grupo estructural (A, B, y C) con el propósito de evaluar el comportamiento de diferentes niveles de resistencia de maderas peruanas. La elección fue hecha en base a un promedio de las densidades de las especies clasificadas en cada grupo estructural.

Nombre Común	Nombre Científico	País	Densidad Básica (gr/cm <sup>3</sup> )	Clasificación Estructural
Estoraque	Myroxylon peruiferum	Perú	0.78	A
Almendra	Caryocar coccineum	Perú	0.65	B
Panguana	Brosimum utile	Perú	0.48	C

Tabla 5: Especies de madera latifoliada o tropical peruana elegidas para el análisis en base a su densidad básica (JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA 1984, Manual de diseño para maderas del grupo andino)

Ya definidas las especies de madera, se procedió a calcular sus propiedades mecánicas: el módulo de elasticidad “ $E$ ” y la resistencia última en compresión paralela al grano “ $R_U$ ”. Para ello, el manual de diseño del acuerdo de Cartagena indica dos ecuaciones empíricas, en base a la densidad básica, para hallar el módulo de elasticidad: una de tendencia lineal y otra exponencial. En el caso de  $R_U$  el manual presenta dos ecuaciones de las mismas características que las dos anteriores (JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA 1984: página 1-30).

Para propósitos de este proyecto, se promediaron los resultados de las ecuaciones lineales y exponenciales. Los cálculos se realizaron en base al módulo de elasticidad promedio y el esfuerzo admisible en compresión paralela se obtuvo luego de aplicar un factor de seguridad de 1.5 al esfuerzo de rotura promedio de cada densidad básica. Los valores de las propiedades mecánicas utilizadas en el análisis son las que siguen (cabe resaltar que las propiedades mecánicas presentadas corresponden a madera en estado verde, es decir, que aún no ha pasado por el horno y no ha sufrido deshidratación completa. Esto es aceptable, ya que, en este caso, la madera no se utilizará para componentes estructurales como vigas o columnas, sino pilotes, los cuales no requieren un secado en horno, tan solo una cobertura impermeabilizante sencilla).

Nombre Común	País	Clasificación Estructural	Módulo de Elasticidad “ $E$ ” (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de rotura en compresión paralela (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo admisible en compresión paralela (kg/cm <sup>2</sup> ) (F.S. = 1.5)
Estoraque	Perú	A	145,931.36	520.77	347.18
Almendra	Perú	B	122,498.07	417.38	278.25
Panguana	Perú	C	91,780.12	286.16	190.77

Tabla 6: Propiedades mecánicas de las especies elegidas en estado verde (no seco de horno) (Fuente propia)

Una vez definidas las propiedades mecánicas de los pilotes de madera, se procedió a definir las formas y tamaños de la sección. Como dicho anteriormente, se están considerando 2 tipos de secciones y 3 tipos de tamaños para cada una. De esta manera, las formas de las secciones serán circulares y cuadrangulares llenas. La sección cuadrangular se obtendría por simple aserrado y la circular podría obtenerse directamente como el tronco entero o por aserrado también.

Para las secciones circulares se definieron 3 diámetros (300, 400 y 500 mm) que permanecen constantes a lo largo de la longitud del pilote. En este caso, las longitudes de los pilotes permanecen fijas debido a que el diámetro del pilote, necesariamente, es relativo a la longitud, ya que se trata de un material orgánico (CHELLIS 1971: página 270). Por esta razón, las longitudes serán de 10, 15 y 20 metros para los diámetros de 300, 400 y 500 milímetros respectivamente. No obstante, cada pilote tendrá una densidad definida. Esto hace que en total existan 9 pilotes circulares de madera latifoliada peruana.

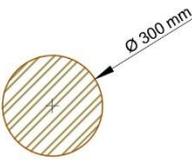
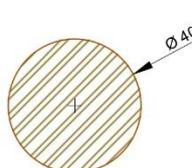
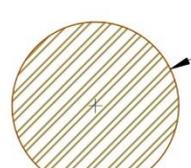
Pilotes de madera latifoliada (tropical) peruana de sección circular utilizados en el análisis		
		
<p><u>Especificaciones técnicas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro en la cabeza del pilote: Ø 300 mm</li> <li>• Diámetro en la punta del pilote: Ø 300 mm</li> <li>• Tipos de madera latifoliada: Palo sangre negro, Almendro y Panguana</li> <li>• Densidades básicas (respectivamente): 0.78, 0.65 y 0.48 gr/cm<sup>3</sup></li> <li>• Longitud del pilote: 10 m</li> </ul>	<p><u>Especificaciones técnicas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro en la cabeza del pilote: Ø 400 mm</li> <li>• Diámetro en la punta del pilote: Ø 400 mm</li> <li>• Tipos de madera latifoliada: Palo sangre negro, Almendro y Panguana</li> <li>• Densidades básicas (respectivamente): 0.78, 0.65 y 0.48 gr/cm<sup>3</sup></li> <li>• Longitud del pilote: 15 m</li> </ul>	<p><u>Especificaciones técnicas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro en la cabeza del pilote: Ø 500 mm</li> <li>• Diámetro en la punta del pilote: Ø 500 mm</li> <li>• Tipos de madera latifoliada: Palo sangre negro, Almendro y Panguana</li> <li>• Densidades básicas (respectivamente): 0.78, 0.65 y 0.48 gr/cm<sup>3</sup></li> <li>• Longitud del pilote: 20 m</li> </ul>

Figura 1: Secciones circulares de los pilotes de madera latifoliada (tropical) peruana utilizados en el análisis (Fuente propia)

En cuanto a las secciones cuadrangulares, se definieron 3 anchos (250, 300 y 350 mm) que permanecen constantes a lo largo de la longitud del pilote. Al igual que las secciones circulares, las longitudes permanecen fijas debido a que debe mantener relación con el ancho del pilote (CHELLIS 1971: página 270). Por esta razón, las longitudes serán de 10, 15 y 20 metros para los anchos de 250, 300 y 350 milímetros respectivamente. De igual

manera, cada pilote tendrá una densidad definida. Esto hace que en total existan 9 pilotes cuadrangulares de madera latifoliada peruana.

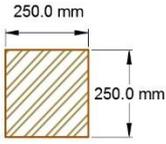
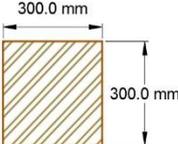
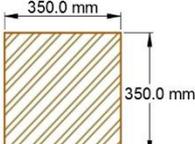
Pilotes de madera latifoliada (tropical) peruana de sección cuadrangular utilizados en el análisis		
		
<p><u>Especificaciones técnicas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ancho en la cabeza del pilote: 250 mm</li> <li>Ancho en la punta del pilote: 250 mm</li> <li>Tipos de madera latifoliada: Palo sangre negro, Almendro y Panguana</li> <li>Densidades básicas (respectivamente): 0.78, 0.65 y 0.48 gr/cm<sup>3</sup></li> <li>Longitud del pilote: 10 m</li> </ul>	<p><u>Especificaciones técnicas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ancho en la cabeza del pilote: 300 mm</li> <li>Ancho en la punta del pilote: 300 mm</li> <li>Tipos de madera latifoliada: Palo sangre negro, Almendro y Panguana</li> <li>Densidades básicas (respectivamente): 0.78, 0.65 y 0.48 gr/cm<sup>3</sup></li> <li>Longitud del pilote: 15 m</li> </ul>	<p><u>Especificaciones técnicas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ancho en la cabeza del pilote: 350 mm</li> <li>Ancho en la punta del pilote: 350 mm</li> <li>Tipos de madera latifoliada: Palo sangre negro, Almendro y Panguana</li> <li>Densidades básicas (respectivamente): 0.78, 0.65 y 0.48 gr/cm<sup>3</sup></li> <li>Longitud del pilote: 20 m</li> </ul>

Figura 2: Secciones cuadrangulares de los pilotes de madera latifoliada (tropical) peruana utilizadas en el análisis (Fuente propia)

En resumen, se presentan, a continuación, los 18 casos de pilotes de madera latifoliada de sección circular y cuadrangular utilizados en el análisis, así como sus características físicas y mecánicas más importantes.

Codificación de los pilotes circulares de madera latifoliada (tropical) peruana utilizados en el análisis					
Longitud (m)	Área de la sección (m <sup>2</sup> )	Peso (kg)	Módulo de Elasticidad "Em" (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de rotura en compresión paralela (kg/cm <sup>2</sup> )	Código
10.00	0.07	342.23	9.18E+04	286.16	<b>1</b>
10.00	0.07	463.44	1.22E+05	417.38	<b>2</b>
10.00	0.07	556.12	1.46E+05	520.77	<b>3</b>
15.00	0.13	911.74	9.18E+04	286.16	<b>4</b>
15.00	0.13	1,234.65	1.22E+05	417.38	<b>5</b>
15.00	0.13	1,481.58	1.46E+05	520.77	<b>6</b>
20.00	0.20	1,898.56	9.18E+04	286.16	<b>7</b>
20.00	0.20	2,570.97	1.22E+05	417.38	<b>8</b>
20.00	0.20	3,085.16	1.46E+05	520.77	<b>9</b>

Tabla 7: Pilotes de madera latifoliada peruana de sección circular utilizados en el análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes (Catálogos y fuentes señaladas anteriormente)

Codificación de los pilotes cuadrangulares de madera latifoliada (tropical) peruana utilizados en el análisis					
Longitud (m)	Área de la sección (m <sup>2</sup> )	Peso (kg)	Módulo de Elasticidad "Em" (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de rotura en compresión paralela (kg/cm <sup>2</sup> )	Código
10.00	0.06	302.17	9.18E+04	286.16	10
10.00	0.06	409.18	1.22E+05	417.38	11
10.00	0.06	491.02	1.46E+05	520.77	12
15.00	0.09	651.74	9.18E+04	286.16	13
15.00	0.09	882.57	1.22E+05	417.38	14
15.00	0.09	1,059.08	1.46E+05	520.77	15
20.00	0.12	1,181.94	9.18E+04	286.16	16
20.00	0.12	1,600.55	1.22E+05	417.38	17
20.00	0.12	1,920.65	1.46E+05	520.77	18

Tabla 8: Pilotes de madera latifoliada peruana de sección cuadrangular utilizados en el análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes (Catálogos y fuentes señaladas anteriormente)

### 6.1.2. Pilotes de acero estructural

La definición de las propiedades físicas y mecánicas de este tipo de pilotes fue un poco más laboriosa debido a la alta cantidad de oferta que tienen estos en el mercado. Especialmente los de sección tubular, que suelen ser rellenados con concreto luego de colocar una armadura interna (pues de esa manera, el concreto se encuentra en todo momento en un estado triaxial de esfuerzos, lo que le permite al diseñador colocar cargas concentradas extremadamente altas sin dañar la integridad del concreto en el elemento estructural).

Debido a la gran variedad de tipos de acero en existencia en el mercado, la parte más sencilla fue identificar los tipos de sección que fueron utilizados en el análisis. Para propósitos de esta investigación, se eligieron las más utilizadas en el mercado, las cuales son secciones "H" y tubulares.

Para los pilotes de sección "H" se tomaron en cuenta los productos de diversas compañías y fábricas europeas y estadounidenses como TATA Steel y LB Foster, así como artículos, libros académicos y normas, como el libro de R. Chellis, Zaven Davidian, la norma del AISC (American Institute of Steel Construction), la norma del Instituto Americano del Petróleo API 5L, entre otros. Se seleccionaron 3 tamaños representativos de cada fuente para compararlos y definir las secciones finales.

Denominación / Número de serie	Compañía / Fábrica	Profundidad de la sección "d" (cm)	Ancho del ala "bf" (cm)	Espesor del alma "tw" (cm)	Espesor del ala "tf" (cm)	Área neta (cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
W 356x368 174	TATA Steel	36.14	37.85	2.03	2.04	221.00	2.09E+06
W 305x305 110	TATA Steel	30.79	31.07	1.53	1.54	140.00	2.09E+06
W 254x254 71	TATA Steel	24.97	25.80	1.20	1.20	90.40	2.09E+06

Tabla 9: Tamaños de secciones de pilotes H de TATA Steel (H or Bearing Piles TATA Steel)

Denominación / Número de serie	Compañía / Fábrica	Profundidad de la sección "d" (cm)	Ancho del ala "bf" (cm)	Espesor del alma "tw" (cm)	Espesor del ala "tf" (cm)	Área neta (cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
W 14x99	AISC	36.07	37.08	1.23	1.98	187.70	2.09E+06
W 12x50	AISC	30.99	20.52	0.94	1.63	94.20	2.09E+06
W 10x39	AISC	25.20	20.29	0.80	1.35	74.20	2.09E+06

Tabla 10: Tamaños de secciones de pilotes H de la norma AISC (American Institute for Steel Construction)

Denominación / Número de serie	Compañía / Fábrica	Profundidad de la sección "d" (cm)	Ancho del ala "bf" (cm)	Espesor del alma "tw" (cm)	Espesor del ala "tf" (cm)	Área neta (cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
HP 14x117	LB Foster	36.09	37.81	2.04	2.04	221.94	2.09E+06
HP 12x84	LB Foster	31.19	31.23	1.74	1.55	158.71	2.09E+06
HP 10x42	LB Foster	24.64	25.59	1.05	1.07	80.00	2.09E+06

Tabla 11: Tamaños de secciones de pilotes H del catálogo de LB Foster (LB Foster Piling Products)

Denominación / Número de serie	Compañía / Fábrica	Profundidad de la sección "d" (cm)	Ancho del ala "bf" (cm)	Espesor del alma "tw" (cm)	Espesor del ala "tf" (cm)	Área neta (cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
BP14	Bethlehem Steel (R. Chellis)	36.14	37.80	2.04	2.04	222.19	2.09E+06
BP12	Bethlehem Steel (R. Chellis)	30.78	31.04	1.54	1.54	140.39	2.09E+06
BP10	Bethlehem Steel (R. Chellis)	24.79	25.65	1.11	1.11	83.55	2.09E+06

Tabla 12: Tamaños de secciones de pilotes H de la tabla de secciones de Bethlehem Steel del libro de R. Chellis (R. Chellis 1971, Página 619)

Una vez analizadas las secciones, se puede ver que las dimensiones son bastante similares entre sí con variaciones mínimas en una dimensión u otra. En base a ello, se tomaron

secciones que se aproximaban más a los valores promedio del grupo. Esto da como resultado, para propósitos de este análisis, los siguientes tamaños de sección “H”:

Denominación / Número de serie	Compañía / Fábrica	Profundidad de la sección "d" (cm)	Ancho del ala "bf" (cm)	Espesor del alma "tw" (cm)	Espesor del ala "tf" (cm)	Área neta (cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
HP 14x117	LB Foster	36.09	37.81	2.04	2.04	221.94	2.09E+06
W 12x50	AISC	30.99	20.52	0.94	1.63	94.20	2.09E+06
BP10	Bethlehem Steel (R. Chellis)	24.79	25.65	1.11	1.11	83.55	2.09E+06

Tabla 13: Tamaños de secciones “H” elegidos para el análisis (El módulo de elasticidad proviene de FinnRA, API 5L y AISC) (AISC, LB Foster y R. Chellis)

En cuanto a los pilotes de sección tubular, se extrajeron diferentes ejemplares de los catálogos de TATA Steel, LB Foster y AISC para poder determinar aquellas a utilizar en el análisis.

Denominación / Número de serie	Compañía / Fábrica	Diámetro exterior (cm)	Diámetro interior (cm)	Espesor (cm)	Área neta (cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
HSS 20.000x0.500	AISC	50.80	48.44	1.18	183.87	2.09E+06
HSS 16.000x0.312	AISC	40.64	39.16	0.74	92.90	2.09E+06
HSS 12.500x0.250	AISC	31.75	30.57	0.59	57.94	2.09E+06

Tabla 14: Tamaños de secciones tubulares de AISC (American Institute for Steel Construction)

Denominación / Número de serie	Compañía / Fábrica	Diámetro exterior (cm)	Diámetro interior (cm)	Espesor (cm)	Área neta (cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
S355J2H-508	TATA Steel	50.80	48.30	1.25	194.58	2.09E+06
S355J2H-406	TATA Steel	40.64	39.04	0.80	100.13	2.09E+06
S355J2H-324	TATA Steel	32.39	31.13	0.63	62.86	2.09E+06

Tabla 15: Tamaños de secciones tubulares de TATA Steel (Celsius 355 pipe piles, TATA Steel)

Denominación / Número de serie	Compañía / Fábrica	Diámetro exterior (cm)	Diámetro interior (cm)	Espesor (cm)	Área neta (cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
ERW-500	LB Foster	50.80	48.26	1.27	197.62	2.09E+06
ERW-400	LB Foster	40.64	39.06	0.79	99.21	2.09E+06
ERW-300	LB Foster	30.48	29.21	0.64	59.54	2.09E+06

Tabla 16: Tamaños de secciones tubulares de LB Foster (Electric Resistance Weld – Pipe piles, LB Foster)

Al igual que para las secciones “H”, las dimensiones son muy similares entre sí, variando sobre todo en el espesor del elemento. Sin embargo esta variación es minúscula en términos de la magnitud de la unidad con la que está tratando. Dicho esto, las secciones elegidas fueron aquellas que se aproximaban más a los valores promedio de las distintas agrupaciones de tamaño, lo cual dejó las siguientes secciones tubulares para utilizarse en el análisis:

Denominación / Número de serie	Compañía / Fábrica	Diámetro exterior (cm)	Diámetro interior (cm)	Espesor (cm)	Área neta (cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
ERW-500	LB Foster	50.80	48.26	1.27	197.62	2.09E+06
S355J2H-406	TATA Steel	40.64	39.04	0.80	100.13	2.09E+06
HSS 12.500x0.250	AISC	31.75	30.57	0.59	57.94	2.09E+06

Tabla 17: Tamaños de secciones tubulares elegidos para el análisis (El módulo de elasticidad proviene de FinnRA, API 5L y AISC) (AISC, LB Foster y R. Chellis)

Finalmente, se definieron las propiedades mecánicas del tipo de acero que fue utilizado en el análisis. Para lograr ese objetivo, se revisaron diversas normas (ASTM, Fe 510 y API 5L) así como diversos artículos y tablas del AISC y diferentes compañías. Entre todas estas fuentes, se eligió tomar los valores proporcionados por la norma API 5L (API 5L, página 1) en la cual se basa el diseño de los pilotes tubulares según el manual finlandés (FinnRA 2000, página 57) de caminos señalado anteriormente.

Se quiso dar una perspectiva amplia en cuanto al comportamiento del acero, ya que no necesariamente se puede tener la ventaja de trabajar con esfuerzos de fluencia mayores a 4200 kg/cm<sup>2</sup> (ya que se puede aprovechar la oportunidad de reciclar vías férreas), que es un acero de grado 60 usado comúnmente en construcción de elementos de concreto API 5L, página 1) los cuales definen el esfuerzo de fluencia mínimo en 2500, 4500 y 5700 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente. Cada grado tendrá 3 tamaños de sección “H” y tubular de pilote con una longitudes correspondiente: 15, 20 y 25 metros respectivamente. En total, el número de pilotes de acero asciende a 18 unidades. El valor de la densidad del acero utilizado para el cálculo del peso de los pilotes fue extraído del manual de la Administración Nacional Finlandesa de Caminos (FinnRA 2000, página 50) y equivale a 7.85 toneladas por metro cúbico de material (este valor también es usado por la AISC) y el módulo de elasticidad de Young fue extraído de las propiedades de secciones de acero estructural del AISC, el cual equivale a valor de  $2.04 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup> (29000.00 ksi, según se

menciona en el documento) (13<sup>ra</sup> edición de las propiedades de secciones de acero estructural del AISC 2005).

Pilotes de acero estructural de sección "H" utilizados en el análisis		
<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Profundidad de la sección: 247.9 mm</li> <li>• Ancho del ala: 256.5 mm</li> <li>• Espesor del alma: 11.1 mm</li> <li>• Espesor del ala: 11.1 mm</li> <li>• Área neta: 83.55 cm<sup>2</sup></li> <li>• Módulo de elasticidad: 2.04E+06 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Grados de acero: L245, L390 y L485M (según la norma API 5L)</li> <li>• Esfuerzos de fluencia mínimos: 2500, 4500 y 5700 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Longitud del pilote: 15m</li> </ul>	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Profundidad de la sección: 309.9 mm</li> <li>• Ancho del ala: 205.2 mm</li> <li>• Espesor del alma: 9.4 mm</li> <li>• Espesor del ala: 16.3 mm</li> <li>• Área neta: 94.20 cm<sup>2</sup></li> <li>• Módulo de elasticidad: 2.04E+06 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Grados de acero: L245, L390 y L485M (según la norma API 5L)</li> <li>• Esfuerzos de fluencia mínimos: 2500, 4500 y 5700 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Longitud del pilote: 20m</li> </ul>	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Profundidad de la sección: 360.9 mm</li> <li>• Ancho del ala: 378.1 mm</li> <li>• Espesor del alma: 20.4 mm</li> <li>• Espesor del ala: 20.4 mm</li> <li>• Área neta: 221.94 cm<sup>2</sup></li> <li>• Módulo de elasticidad: 2.04E+06 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Grados de acero: L245, L390 y L485M (según la norma API 5L)</li> <li>• Esfuerzos de fluencia mínimos: 2500, 4500 y 5700 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Longitud del pilote: 25m</li> </ul>

Figura 3: Secciones "H" de los pilotes de acero estructural utilizados en el análisis (Fuente propia)

Pilotes de acero estructural de sección tubular utilizados en el análisis		
<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro exterior: 317.5 mm</li> <li>• Diámetro interior: 305.7 mm</li> <li>• Espesor: 5.9 mm</li> <li>• Área neta: 57.94 cm<sup>2</sup></li> <li>• Módulo de elasticidad: 2.04E+06 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Grados de acero: L245, L390 y L485M (según la norma API 5L)</li> <li>• Esfuerzos de fluencia mínimos: 2500, 4500 y 5700 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Longitud del pilote: 15m</li> </ul>	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro exterior: 406.4 mm</li> <li>• Diámetro interior: 390.4 mm</li> <li>• Espesor: 8.0 mm</li> <li>• Área neta: 100.13 cm<sup>2</sup></li> <li>• Módulo de elasticidad: 2.04E+06 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Grados de acero: L245, L390 y L485M (según la norma API 5L)</li> <li>• Esfuerzos de fluencia mínimos: 2500, 4500 y 5700 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Longitud del pilote: 20m</li> </ul>	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro exterior: 508 mm</li> <li>• Diámetro interior: 482.6 mm</li> <li>• Espesor: 12.7 mm</li> <li>• Área neta: 197.62 cm<sup>2</sup></li> <li>• Módulo de elasticidad: 2.04E+06 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Grados de acero: L245, L390 y L485M (según la norma API 5L)</li> <li>• Esfuerzos de fluencia mínimos: 2500, 4500 y 5700 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Longitud del pilote: 25m</li> </ul>

Figura 4: Secciones tubulares de los pilotes de acero estructural utilizados en el análisis (Fuente propia)

En resumen, se presentan, a continuación, los 18 casos de pilotes de acero estructural de sección “H” y tubular utilizados en el análisis, así como sus características físicas y mecánicas más importantes.

Codificación de los pilotes de sección H de acero estructural utilizada en el análisis					
Área neta (cm <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Peso (kg)	Esfuerzo de fluencia "fy" (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad "E" (kg/cm <sup>2</sup> )	Código
83.55	15.00	983.68	2,500.00	2.09E+06	19
83.55	15.00	983.68	4,500.00	2.09E+06	20
83.55	15.00	983.68	5,700.00	2.09E+06	21
94.20	20.00	1,478.78	2,500.00	2.09E+06	22
94.20	20.00	1,478.78	4,500.00	2.09E+06	23
94.20	20.00	1,478.78	5,700.00	2.09E+06	24
221.94	25.00	4,355.09	2,500.00	2.09E+06	25
221.94	25.00	4,355.09	4,500.00	2.09E+06	26
221.94	25.00	4,355.09	5,700.00	2.09E+06	27

Tabla 18: Pilotes de acero estructural de sección “H” utilizados en el análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes (Catálogos y fuentes señaladas anteriormente)

Codificación de los pilotes tubulares de acero estructural utilizada en el análisis					
Área neta (cm <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Peso (kg)	Esfuerzo de fluencia "fy" (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad "E" (kg/cm <sup>2</sup> )	Código
57.94	15.00	682.11	2,500.00	2.09E+06	28
57.94	15.00	682.11	4,500.00	2.09E+06	29
57.94	15.00	682.11	5,700.00	2.09E+06	30
100.13	20.00	1,571.85	2,500.00	2.09E+06	31
100.13	20.00	1,571.85	4,500.00	2.09E+06	32
100.13	20.00	1,571.85	5,700.00	2.09E+06	33
197.62	25.00	3,877.78	2,500.00	2.09E+06	34
197.62	25.00	3,877.78	4,500.00	2.09E+06	35
197.62	25.00	3,877.78	5,700.00	2.09E+06	36

Tabla 19: Pilotes de acero estructural de sección tubular utilizados en el análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes (Catálogos y fuentes señaladas anteriormente)

### 6.1.3. Pilotes pretensados de concreto armado

En el caso de la elección de las propiedades mecánicas y físicas de los pilotes de concreto armado pretensado, se eligió consultar únicamente a las normas correspondientes del Instituto Americano del Concreto (ACI), el cual brindó las características necesarias para armar el repertorio casuístico necesario para los elementos de este tipo de material. Dado que el concreto armado es uno de los materiales compuestos más utilizados en el mundo y el más utilizado en el Perú, se vio pertinente incluirlo en el análisis del presente proyecto de investigación.

En base a los textos del ACI, las secciones más comúnmente utilizadas son las de forma octogonal y tubular. La sección octogonal brinda una rigidez relativamente buena en 4 ejes principales, la cual se acerca a la brindada por una sección circular, la cual posee una rigidez constante en todos los planos perpendiculares a su sección. Esta se usa para cualquier tipo de estructuras y puede resistir un rango amplio de cargas debido a la gran gama de resistencias de concreto que se pueden incorporar al diseño. En cuanto a las secciones tubulares, estas suelen ser dirigidas hacia grandes estructuras que transmiten cargas muy elevadas. La razón por la cual el centro es hueco es para poder reducir el peso del elemento sin que esto signifique una pérdida de rigidez significativa; casi el mismo concepto utilizado en el caso de vigas con el ancho de alma reducido.

Para lograr terminar de definir las propiedades mecánicas del concreto pretensado, se siguieron las pautas brindadas por los textos del ACI, la Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales (ASTM) y el Departamento de Transporte de los Estados Unidos (DOT), los cuales establecen las siguientes condiciones:

- Cada tendón de acero pretensado consiste de 7 alambres de acero de alta tensión (US DOT 2012: Página 1), cuyo esfuerzo de fluencia (en base a la sección de área total igual a  $0.99 \text{ cm}^2$ ) debe ser equivalente al 90% del valor del esfuerzo mínimo de rotura (US DOT 2012: Página 1). Al ser el esfuerzo mínimo de rotura " $f_{pu}$ " de los tendones igual a 270 ksi o  $19022.77 \text{ kg/cm}^2$ , el esfuerzo mínimo de fluencia equivale a 243.14 ksi o  $17120.49 \text{ kg/cm}^2$ .

Propiedades mecánicas de los tendones de acero				
Composición	Esfuerzo de rotura mínimo (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo mínimo de fluencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación unitaria de fluencia
Tendones de 7 cables	19,022.77	17,120.49	2.01E+06	0.00853

Tabla 20: Propiedades mecánicas de los tendones de acero para el pretensado de la sección (Manual de diseño de elementos estructurales pretensado del US DOT de 2012: Página 1)

- El preesfuerzo aplicado por los tendones de acero sobre la sección de concreto debe equivaler a un máximo del 20% de la resistencia última del concreto " $f_c$ " luego de pérdidas (ACI Structural Journal 1970: Página 204).

En base a los parámetros de partida definidos al inicio de este acápite del documento, se definieron 3 resistencias del concreto:  $280 \text{ kg/cm}^2$ ,  $350 \text{ kg/cm}^2$  y  $450 \text{ kg/cm}^2$ , con sus respectivos pre-esfuerzos de  $56 \text{ kg/cm}^2$ ,  $70 \text{ kg/cm}^2$  y  $90 \text{ kg/cm}^2$ .

Propiedades mecánicas de los concretos utilizados en los pilotes			
Resistencias últimas (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	Preesfuerzo (0.2 f 'c) (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en estado inicial de
280.00	2.51E+05	56.00	0.000223
350.00	2.81E+05	70.00	0.000249
450.00	3.18E+05	90.00	0.000283

Tabla 21: Resistencias últimas de los tipos de concretos utilizados para la definición de las propiedades mecánicas del concreto, así como sus pre-esfuerzos equivalentes (ACI Structural Journal 1970: Página 204)

Estas condiciones limitantes del concreto conllevaron a un estado de esfuerzos, luego de las pérdidas de esfuerzo en el acero y concreto, que se muestra en la tabla inferior.

Estado de esfuerzos durante el estado de preesfuerzo			
Resistencias últimas (kg/cm <sup>2</sup> )	Preesfuerzo en el concreto (0.2 f 'c) (kg/cm <sup>2</sup> )	Preesfuerzo en el acero (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación en estado inicial de preesfuerzo
280.00	56.00	447.99	0.000223
350.00	70.00	500.87	0.000249
450.00	90.00	567.94	0.000283

Tabla 22: Estado de esfuerzos durante el pretensado (luego de pérdidas) (Fuente propia)

Habido definido lo anterior, el siguiente paso fue definir los 3 tamaños de sección octogonal y tubulares en base a lo recomendado por el ACI.

Procedencia	Diámetro de circunferencia inscrita (cm)	Recubrimiento (cm)	# Tendones	Área nominal de tendones (cm <sup>2</sup> )	Diámetro espiral transversal (cm)	Área neta (cm <sup>2</sup> )
ACI	50.80	6.00	16	0.99	0.64	2,137.87
ACI	41.91	6.00	11	0.99	0.64	1,455.09
ACI	35.56	5.00	8	0.99	0.64	1,047.56

Tabla 23: Secciones octogonales de pilotes de concreto armado pretensado elegidas para el análisis (ACI Structural Journal 1970: Página 620)

Procedencia	Diámetro exterior (cm)	Diámetro interior (cm)	Espesor (cm)	Recubrimiento (cm)	# Tendones	Área nominal de tendones (cm <sup>2</sup> )	Diámetro espiral transversal (cm)	Área neta (cm <sup>2</sup> )
ACI	137.16	111.76	12.70	5.00	38	0.99	0.64	4,965.73
ACI	121.92	96.52	12.70	5.00	34	0.99	0.64	4,357.68
ACI	91.44	66.04	12.70	5.00	24	0.99	0.64	3,141.59

Tabla 24: Secciones tubulares de pilotes de concreto armado pretensado elegidas para el análisis (ACI Structural Journal 1970: Página 620)

Como último paso, se asignaron las longitudes de 15, 20 y 25 metros a los pilotes en orden ascendente en términos de área total de la sección.

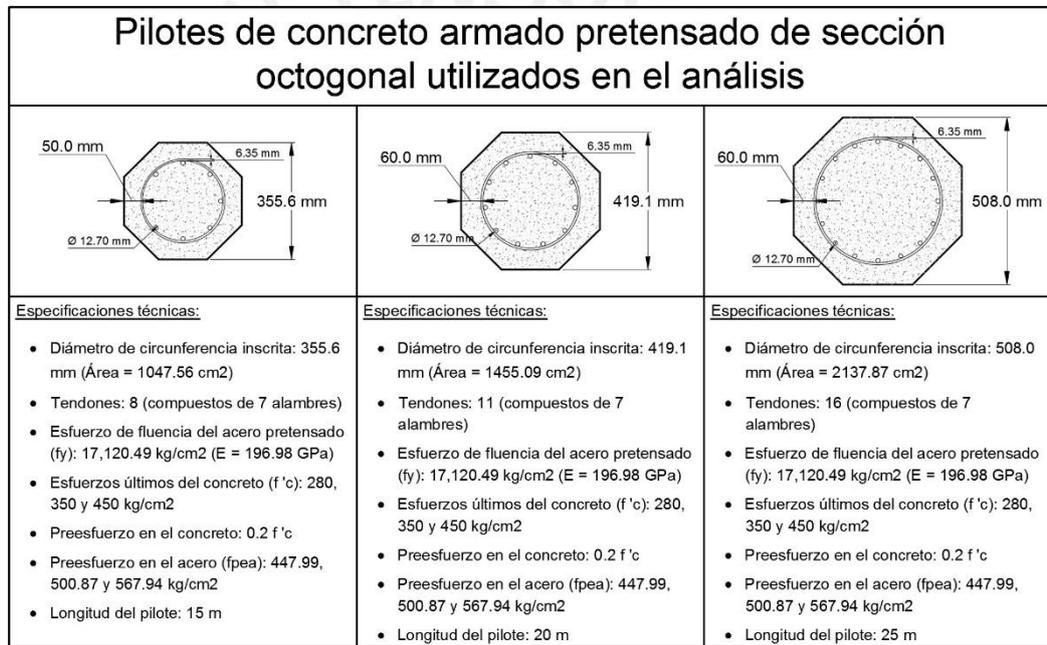


Figura 5: Secciones octogonales de los pilotes de concreto armado pretensado utilizados en el análisis (Fuente propia)

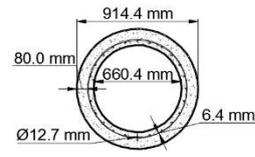
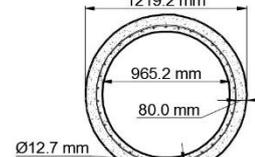
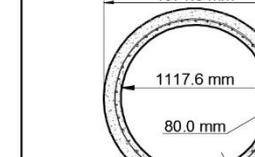
Pilotes de concreto armado pretensado de sección tubular utilizados en el análisis		
		
<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro exterior e interior: 914.4 y 660.4 mm (Espesor: 127.0 mm)</li> <li>• Tendones: 28 (cada tendón está compuesto de 7 alambres)</li> <li>• Esfuerzo de fluencia del acero pretensado (<math>f_y</math>): 17,120.49 kg/cm<sup>2</sup> (<math>E = 196.98</math> GPa)</li> <li>• Esfuerzos últimos del concreto (<math>f'c</math>): 280, 350 y 450 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Preesfuerzo en el concreto: <math>0.2 f'c</math></li> <li>• Preesfuerzo en el acero (<math>f_{pea}</math>): 447.99, 500.87 y 567.94 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Longitud del pilote: 15 m</li> </ul>	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro exterior e interior: 1219.2 y 965.2 mm (Espesor: 127.0 mm)</li> <li>• Tendones: 34 (cada tendón está compuesto de 7 alambres)</li> <li>• Esfuerzo de fluencia del acero pretensado (<math>f_y</math>): 17,120.49 kg/cm<sup>2</sup> (<math>E = 196.98</math> GPa)</li> <li>• Esfuerzos últimos del concreto (<math>f'c</math>): 280, 350 y 450 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Preesfuerzo en el concreto: <math>0.2 f'c</math></li> <li>• Preesfuerzo en el acero (<math>f_{pea}</math>): 447.99, 500.87 y 567.94 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Longitud del pilote: 20 m</li> </ul>	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro exterior e interior: 1371.6 y 1117.6 mm (Espesor: 127.0 mm)</li> <li>• Tendones: 38 (cada tendón está compuesto de 7 alambres)</li> <li>• Esfuerzo de fluencia del acero pretensado (<math>f_y</math>): 17,120.49 kg/cm<sup>2</sup> (<math>E = 196.98</math> GPa)</li> <li>• Esfuerzos últimos del concreto (<math>f'c</math>): 280, 350 y 450 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Preesfuerzo en el concreto: <math>0.2 f'c</math></li> <li>• Preesfuerzo en el acero (<math>f_{pea}</math>): 447.99, 500.87 y 567.94 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Longitud del pilote: 25 m</li> </ul>

Figura 6: Secciones tubulares de los pilotes de concreto armado pretensado utilizados en el análisis (Fuente propia)

En resumen, se presentan, a continuación, los 18 casos de pilotes de concreto armado pretensado de sección octogonal y tubular utilizados en el análisis, así como sus características físicas y mecánicas más importantes.

Codificación de los pilotes octogonales de concreto armado pretensado utilizados en el análisis								
Resistencia última del concreto (kg/cm <sup>2</sup> )	Preesfuerzo en el concreto ( $0.2 f'c$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )	# de tendones	Área tendones (cm <sup>2</sup> )	Área de concreto (cm <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Peso (kg)	EA del pilote (kg)	Código
280.00	56.00	8	7.90	1,039.66	15.00	3,835.83	2.77E+08	37
350.00	70.00	8	7.90	1,039.66	15.00	3,835.83	3.08E+08	38
450.00	90.00	8	7.90	1,039.66	15.00	3,835.83	3.47E+08	39
280.00	56.00	11	10.86	1,444.23	20.00	7,102.91	3.84E+08	40
350.00	70.00	11	10.86	1,444.23	20.00	7,102.91	4.27E+08	41
450.00	90.00	11	10.86	1,444.23	20.00	7,102.91	4.81E+08	42
280.00	56.00	16	15.79	2,122.08	25.00	13,042.66	5.64E+08	43
350.00	70.00	16	15.79	2,122.08	25.00	13,042.66	6.27E+08	44
450.00	90.00	16	15.79	2,122.08	25.00	13,042.66	7.07E+08	45

Tabla 25: Pilotes de concreto armado pretensado de sección octogonal utilizados en el análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes (Catálogos y fuentes señaladas anteriormente)

Codificación de los pilotes tubulares de concreto armado pretensado utilizados en el análisis (127 mm de espesor)								
Resistencia última del concreto (kg/cm <sup>2</sup> )	Preesfuerzo en el concreto (0.2 f'c) (kg/cm <sup>2</sup> )	# de tendones	Área tendones (cm <sup>2</sup> )	Área de concreto (cm <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Peso (kg)	EA del pilote (kg/cm <sup>2</sup> )	Código
280.00	56.00	28	27.64	3,113.95	15.00	11,535.91	8.37E+08	46
350.00	70.00	28	27.64	3,113.95	15.00	11,535.91	9.29E+08	47
450.00	90.00	28	27.64	3,113.95	15.00	11,535.91	1.05E+09	48
280.00	56.00	34	33.56	4,324.12	20.00	21,283.11	1.15E+09	49
350.00	70.00	34	33.56	4,324.12	20.00	21,283.11	1.28E+09	50
450.00	90.00	34	33.56	4,324.12	20.00	21,283.11	1.44E+09	51
280.00	56.00	38	37.51	4,928.22	25.00	30,306.04	1.31E+09	52
350.00	70.00	38	37.51	4,928.22	25.00	30,306.04	1.46E+09	53
450.00	90.00	38	37.51	4,928.22	25.00	30,306.04	1.64E+09	54

Tabla 26: Pilotes de concreto armado pretensado de sección tubular utilizados en el análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes (Catálogos y fuentes señaladas anteriormente)

## 6.2. Martillos

Determinar qué tipo de martillo utilizar durante el proceso de hincado es importante por dos razones fundamentales: la energía proporcionada y la eficiencia mecánica del sistema. Al combinar ambas variables y la eficiencia de transmisión de energía durante el impacto se obtiene la energía real proporcionada por el mazo del martillo al cabezal y, consecuentemente, al pilote, como fue descrito en el capítulo 3. Dicho esto, se definieron 5 tipos de martillo, cada uno con sus propios valores de energía nominal y eficiencia mecánica, para poder procesar los 54 casos de pilotes. De igual manera se intentó tener una gama de energías nominales variada para poder analizar el comportamiento de las ecuaciones de hincado en base a la magnitud de la energía proporcionada.

### 6.2.1. Martillos diésel

El martillo diésel, como mencionado en el capítulo 3, es un sistema que funciona a base de combustible diésel, el cual combustiona dentro de una cámara que contiene pistones que accionan el mecanismo del mazo o levantan el peso del mazo hasta una altura proporcional a la energía explosiva de la combustión. Dado que este tipo de martillo es uno de los más utilizados en el mercado actual se trató de abarcar la mayor cantidad de marcas y características posibles para determinar el martillo a utilizar. A continuación se presentan el listado de martillos diésel investigados por marca y modelos, así como sus características físicas y mecánicas.

Marca	Modelo	Tipo	Mecanismo	Energía Nominal "En" (kg.m)	Peso del martillo (kg)	Fuente
McKiernan-Terry	DE-20		Diesel	2,212.00	907.00	<a href="http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html">http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html</a>
McKiernan-Terry	DE-30		Diesel	3,100.00	1,270.00	<a href="http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html">http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html</a>
McKiernan-Terry	DE-40		Diesel	4,424.00	1,814.00	<a href="http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html">http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html</a>
McKiernan-Terry	DE-20B		Diesel	2,008.91	909.10	McKiernan-Terry - Diesel Hammers
McKiernan-Terry	DE-30B		Diesel	2,812.47	1,272.73	McKiernan-Terry - Diesel Hammers
McKiernan-Terry	DE-50B		Diesel	5,022.95	2,272.73	McKiernan-Terry - Diesel Hammers
McKiernan-Terry	DE-70B		Diesel	7,031.18	3,181.82	McKiernan-Terry - Diesel Hammers

Tabla 27: Martillos diésel de marca McKiernan-Terry (Manual #01808 de McKiernan-Terry 1980: Páginas 3-4, y la página web <http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html>)

Marca	Modelo	Tipo	Mecanismo	Energía Nominal "En" (kg.m)	Peso del martillo (kg)	Fuente
Linkbelt	440		Diesel	2,516.00	1,814.00	<a href="http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html">http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html</a>
Linkbelt	520		Diesel	3,636.00	2,300.00	<a href="http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html">http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html</a>

Tabla 28: Martillos diésel de marca Kobe (Página web <http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html>)

Marca	Modelo	Tipo	Mecanismo	Energía Nominal "En" (kg.m)	Peso del martillo (kg)	Fuente
Delmag	D2		Diesel	185.00	220.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
Delmag	D4		Diesel	387.50	380.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
Delmag	D5		Diesel	1,250.00	500.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
Delmag	D12		Diesel	3,125.00	1,250.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
Delmag	D22		Diesel	5,500.00	2,700.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
Delmag	D30		Diesel	5,400.00	3,000.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
Delmag	D36		Diesel	7,200.00	3,600.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
Delmag	D44		Diesel	9,000.00	4,300.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
Delmag	D55		Diesel	12,425.00	5,400.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
Delmag	D6-32		Diesel	1,427.12	600.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären
Delmag	D8-22		Diesel	2,038.74	800.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären
Delmag	D12-42		Diesel	3,363.91	1,280.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären
Delmag	D16-32		Diesel	4,026.50	1,600.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären
Delmag	D19-42		Diesel	4,842.00	1,820.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären
Delmag	D25-32		Diesel	6,625.89	2,500.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären
Delmag	D30-32		Diesel	7,696.23	3,000.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären
Delmag	D36-32		Diesel	9,123.34	3,600.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären
Delmag	D46-32		Diesel	12,079.51	4,600.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären
Delmag	D62-22		Diesel	16,870.54	6,200.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären
Delmag	D80-23		Diesel	23,394.50	8,000.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären
Delmag	D100-13		Diesel	29,255.86	10,000.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären
Delmag	D150-42		Diesel	42,864.42	15,000.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären
Delmag	D200-42		Diesel	56,982.67	20,000.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären
Delmag	D16-52	Diesel	Iniciador hidráulico	4,026.50	1,600.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären mit Hydraulischen Starter
Delmag	D19-52	Diesel	Iniciador hidráulico	4,842.00	1,820.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären mit Hydraulischen Starter
Delmag	D25-52	Diesel	Iniciador hidráulico	6,625.89	2,500.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären mit Hydraulischen Starter
Delmag	D30-52	Diesel	Iniciador hidráulico	7,696.23	3,000.00	Technische Daten - Delmag Dieselbären mit Hydraulischen Starter

Tabla 29: Martillos diésel de marca Delmag (Catálogo de martillos diésel de Delmag “Dieselbären: Technische Daten” 2010: Páginas 2-7, catálogo de martillos con accionador hidráulico de Delmag 2013: Páginas 2-3, y diapositivas del curso de cimentaciones “IC P01 – Introducción” 2013)

Marca	Modelo	Tipo	Mecanismo	Energía Nominal "En" (kg.m)	Peso del martillo (kg)	Fuente
Linkbelt	440		Diesel	2,516.00	1,814.00	<a href="http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html">http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html</a>
Linkbelt	520		Diesel	3,636.00	2,300.00	<a href="http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html">http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html</a>

Tabla 30: Martillos diésel de marca Linkbelt (Página web <http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html>)

### 6.2.2. Martillos hidráulicos

El martillo hidráulico de caída libre funciona, como mencionado anteriormente en el capítulo 3, de manera similar al martillo de vapor, pero utiliza un mecanismo hidráulico para izar el mazo. Este tipo de martillos es comúnmente utilizado y causa un menor impacto ambiental que el martillo diésel. Sin embargo, requiere de un mantenimiento riguroso y periódico. A continuación se presentan los martillos hidráulicos investigados para este proyecto.

Marca	Modelo	Tipo	Mecanismo	Energía Nominal "En" (kg.m)	Peso del martillo (kg)	Fuente
Yongan Machinery	YC-5	Hidráulico	Acción Simple	6,116.21	5,000.00	<a href="http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html">http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html</a>
Yongan Machinery	YC-8	Hidráulico	Acción Simple	12,232.42	8,000.00	<a href="http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html">http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html</a>
Yongan Machinery	YC-11	Hidráulico	Acción Simple	16,819.57	11,000.00	<a href="http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html">http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html</a>
Yongan Machinery	YC-15	Hidráulico	Acción Simple	22,935.78	15,000.00	<a href="http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html">http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html</a>
Yongan Machinery	YC-17	Hidráulico	Acción Simple	22,935.78	15,000.00	<a href="http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html">http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html</a>
Yongan Machinery	YC-21	Hidráulico	Acción Simple	32,110.09	21,000.00	<a href="http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html">http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html</a>
Yongan Machinery	YC-25	Hidráulico	Acción Simple	38,226.30	25,000.00	<a href="http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html">http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html</a>
Yongan Machinery	YC-35	Hidráulico	Acción Simple	53,516.82	35,000.00	<a href="http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html">http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html</a>

Tabla 31: Martillos hidráulicos de caída libre de marca Yongan Machinery (Página web <http://www.chinavibratoryhammer.es/impact-hammer.html>)

### 6.2.3. Martillos a vapor de acción simple, doble y diferencial

El martillo accionado a vapor fue un martillo ampliamente utilizado en décadas anteriores debido a su combustible de fácil acceso. A pesar de que están siendo desplazados por los tipos de martillos anteriormente mencionados, tienen aún importancia en el mercado. Entre los martillos a vapor, como mencionado en el capítulo 3, podemos diferenciar 3 tipos de mecanismos de funcionamiento: de acción simple, doble y diferencial. A continuación se muestran las marcas investigadas.

Marca	Modelo	Tipo	Mecanismo	Energía Nominal "En" (kg.m)	Peso del martillo (kg)	Fuente
Vulcan	0	Vapor	Acción Simple	3,370.00	3,402.00	<a href="http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html">http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html</a>
Vulcan	008	Vapor	Acción Simple	3,595.00	3,629.00	<a href="http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html">http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html</a>
Vulcan	012	Vapor	Acción Simple	5,403.27	5,443.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/rated-striking-energy-ft-lbs-kj/">http://vulcanhammer.com/specifications/rated-striking-energy-ft-lbs-kj/</a>
Vulcan	530	Vapor	Acción Simple	20,781.82	13,608.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/530-2/">http://vulcanhammer.com/specifications/530-2/</a>
Vulcan	520	Vapor	Acción Simple	13,854.55	9,072.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/520-2/">http://vulcanhammer.com/specifications/520-2/</a>
Vulcan	330	Vapor	Acción Simple	12,468.09	13,608.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/330/">http://vulcanhammer.com/specifications/330/</a>
Vulcan	320	Vapor	Acción Simple	8,312.73	9,072.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/320/">http://vulcanhammer.com/specifications/320/</a>
Vulcan	512	Vapor	Acción Simple	6,650.18	5,443.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/512/">http://vulcanhammer.com/specifications/512/</a>
Vulcan	510	Vapor	Acción Simple	5,715.00	4,536.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/510/">http://vulcanhammer.com/specifications/510/</a>
Vulcan	016	Vapor	Acción Simple	6,754.09	7,371.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/016-2/">http://vulcanhammer.com/specifications/016-2/</a>
Vulcan	014	Vapor	Acción Simple	5,818.91	6,350.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/014/">http://vulcanhammer.com/specifications/014/</a>
Vulcan	508	Vapor	Acción Simple	3,602.18	3,629.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/508/">http://vulcanhammer.com/specifications/508/</a>
Vulcan	010	Vapor	Acción Simple	4,502.73	4,536.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/010/">http://vulcanhammer.com/specifications/010/</a>
Vulcan	506	Vapor	Acción Simple	2,701.64	2,948.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/506/">http://vulcanhammer.com/specifications/506/</a>
Vulcan	008	Vapor	Acción Simple	3,602.18	3,629.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/008/">http://vulcanhammer.com/specifications/008/</a>
Vulcan	505	Vapor	Acción Simple	2,770.91	2,268.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/505/">http://vulcanhammer.com/specifications/505/</a>
Vulcan	306	Vapor	Acción Simple	2,701.64	2,948.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/306/">http://vulcanhammer.com/specifications/306/</a>
Vulcan	006	Vapor	Acción Simple	2,701.64	2,948.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/006/">http://vulcanhammer.com/specifications/006/</a>
Vulcan	305	Vapor	Acción Simple	2,078.18	2,268.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/305/">http://vulcanhammer.com/specifications/305/</a>
Vulcan	#1	Vapor	Acción Simple	2,078.18	2,268.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/1/">http://vulcanhammer.com/specifications/1/</a>
Vulcan	#2	Vapor	Acción Simple	1,005.84	1,360.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/2/">http://vulcanhammer.com/specifications/2/</a>
Vulcan	#3	Vapor	Acción Simple	872.84	953.00	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/3/">http://vulcanhammer.com/specifications/3/</a>
Vulcan	400C	Vapor	Acción Doble	15,723.25	18,181.82	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/400c/">http://vulcanhammer.com/specifications/400c/</a>
Vulcan	200C	Vapor	Acción Doble	6,954.98	9,090.91	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/200c/">http://vulcanhammer.com/specifications/200c/</a>
Vulcan	140C	Vapor	Acción Doble	4,987.64	6,363.64	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/140c/">http://vulcanhammer.com/specifications/140c/</a>
Vulcan	80C	Vapor	Acción Doble	3,387.44	3,636.36	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/80c/">http://vulcanhammer.com/specifications/80c/</a>
Vulcan	65C	Vapor	Acción Doble	2,660.07	2,954.55	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/65c/">http://vulcanhammer.com/specifications/65c/</a>
Vulcan	50C	Vapor	Acción Doble	2,092.04	2,272.73	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/50c/">http://vulcanhammer.com/specifications/50c/</a>
Vulcan	30C	Vapor	Acción Doble	1,005.84	1,363.64	<a href="http://vulcanhammer.com/specifications/30c/">http://vulcanhammer.com/specifications/30c/</a>
Vulcan	140C	Vapor	Acción Diferencial	4,977.00	6,350.00	<a href="http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html">http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html</a>
Vulcan	80C	Vapor	Acción Diferencial	3,380.00	3,629.00	<a href="http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html">http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html</a>

Tabla 32: Martillos a vapor de acción simple, doble y diferencial de marca Vulcan (Catálogo de Vulcan Hammers de la página web <http://www.vulcanhammer.com/specifications/> y la página web <http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html>)

Marca	Modelo	Tipo	Mecanismo	Energía Nominal "En" (kg.m)	Peso del martillo (kg)	Fuente
Raymond International	00	Vapor	Acción Simple	4,493.00	4,536.00	<a href="http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html">http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html</a>
Raymond International	000	Vapor	Acción Simple	5,613.00	5,670.00	<a href="http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html">http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html</a>
Raymond International	15M	Vapor	Acción Doble	2,074.00	2,268.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
Raymond International	80C	Vapor	Acción Doble	3,380.00	3,629.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
Raymond International	125CX	Vapor	Acción Doble	5,616.00	6,804.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
Raymond International	150C	Vapor	Acción Doble	6,740.00	6,804.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
Raymond International	65C	Vapor	Acción Diferencial	2,696.00	2,948.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes

Tabla 33: Martillos a vapor de acción simple, doble y diferencial de marca Raymond International (Diapositivas del curso de ingeniería de cimentaciones "IC P01 – Introducción" 2013 y página web <http://www.ingenierocivilinfo.com/2012/10/construccion-pilotes-martillos-de.html>)

Marca	Modelo	Tipo	Mecanismo	Energía Nominal "En" (kg.m)	Peso del martillo (kg)	Fuente
McKiernan-Terry	S3	Vapor	Acción Simple	1,238.51	1,361.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
McKiernan-Terry	S5	Vapor	Acción Simple	2,245.32	2,268.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
McKiernan-Terry	S8	Vapor	Acción Simple	3,592.71	3,629.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
McKiernan-Terry	S10	Vapor	Acción Simple	4,490.64	4,536.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
McKiernan-Terry	S14	Vapor	Acción Simple	5,143.50	6,350.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
McKiernan-Terry	S20	Vapor	Acción Simple	8,255.52	9,072.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
McKiernan-Terry	MS-350	Vapor	Acción Simple	4,200.00	3,500.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
McKiernan-Terry	MS-500	Vapor	Acción Simple	6,000.00	5,000.00	Cimentaciones Profundas, IC P01, Introducción - Pilotes
McKiernan-Terry	MS-350	Vapor	Acción Simple	4,200.00	3,500.00	McKiernan-Terry - Single Acting Steam Hammers
McKiernan-Terry	MS-500	Vapor	Acción Simple	6,000.00	5,000.00	McKiernan-Terry - Single Acting Steam Hammers
McKiernan-Terry	0	Vapor	Acción Doble	0.00	2.27	McKiernan-Terry Double Acting Steam Hammers
McKiernan-Terry	1	Vapor	Acción Doble	0.00	9.55	McKiernan-Terry Double Acting Steam Hammers
McKiernan-Terry	2	Vapor	Acción Doble	0.00	21.82	McKiernan-Terry Double Acting Steam Hammers
McKiernan-Terry	3	Vapor	Acción Doble	0.00	30.91	McKiernan-Terry Double Acting Steam Hammers
McKiernan-Terry	5	Vapor	Acción Doble	138.55	90.91	McKiernan-Terry Double Acting Steam Hammers
McKiernan-Terry	6	Vapor	Acción Doble	346.36	181.82	McKiernan-Terry Double Acting Steam Hammers
McKiernan-Terry	7	Vapor	Acción Doble	574.96	363.64	McKiernan-Terry Double Acting Steam Hammers
McKiernan-Terry	9-B-3	Vapor	Acción Doble	1,212.27	727.27	McKiernan-Terry Double Acting Steam Hammers
McKiernan-Terry	10-B-3	Vapor	Acción Doble	1,815.19	1,363.64	McKiernan-Terry Double Acting Steam Hammers
McKiernan-Terry	11-B-3	Vapor	Acción Doble	2,653.15	2,272.73	McKiernan-Terry Double Acting Steam Hammers

Tabla 34: Martillos a vapor de acción simple y doble de marca McKiernan-Terry (Manual #01808 de McKiernan-Terry 1980: Páginas 3 a 4, y diapositivas del curso de ingeniería de cimentaciones "IC P01 – Introducción" 2013)

#### 6.2.4. Eficiencias mecánicas de los martillos investigados

El segundo parámetro mencionado al inicio de este subcapítulo es el de la eficiencia mecánica del sistema del martillo. Esta define, como mencionado en el capítulo 3, qué porcentaje de la energía nominal es transferida hacia el cabezal en el momento del impacto del mazo. Este coeficiente depende íntegramente de los componentes mecánicos del martillo y tiene un valor distinto para cada tipo de funcionamiento y mecanismo de acción. Los valores normalmente vienen recomendados por los fabricantes de martillos como Delmag, McKiernan-Terry, Vulcan, entre otros. Estos fueron extraídos de los catálogos respectivos y se presentan a continuación.

Coeficientes de eficiencia mecánica " $\alpha$ " por tipo de martillo			
Marca	Tipo	Mecanismo	Eficiencia ( $\alpha$ )
McKiernan-Terry	Vapor	Acción Simple	0.85
		Acción Doble	0.75
		Acción Diferencial	0.75
		Diesel	1.00
Vulcan	Caída Libre	Poleas y Cabrestante de fricción	0.75
		Poleas y Gatillo	1.00
	Vapor	Acción Simple	0.75
		Acción Doble	0.65
		Acción Diferencial	0.75
Delmag		Diesel	1.00
Linkbelt		Diesel	1.00
Kobe		Diesel	1.00
Raymond International	Vapor	Acción Simple	0.80
		Acción Doble	0.65
		Acción Diferencial	0.75
Yongan Machinery	Hidráulico	Acción Simple	0.85

Tabla 35: Coeficientes de eficiencia mecánica de los martillos de hincado investigados separados por marca y tipo (Catálogos y fuentes anteriormente señaladas)

#### 6.2.5. Parámetros de los martillos elegidos para el análisis

Dado que el propósito de este proyecto de investigación es abarcar valores lo suficientemente generales y comunes para poder extrapolar los valores al grupo poblacional respectivo, fue de vital importancia elegir los valores de las energías nominales de tal manera que abarquen distintos niveles de transmisión de energía. Dicho esto, los tipos de martillo, sus eficiencias mecánicas y códigos elegidos fueron los siguientes:

Marca	Modelo	Tipo de martillo	Mecanismo del martillo	Energía Nominal (En)	Peso del martillo (kg)	Eficiencia Mecánica ( $\alpha$ )	Código
Delmag	D62-22		Diesel	16,870.54	6,200.00	1.00	D
Yongan Machinery	YC-11	Hidráulico	Acción Simple	16,819.57	11,000.00	0.85	H
Vulcan	520	Vapor	Acción Simple	13,854.55	9,072.00	0.75	V1
Vulcan	200C		Acción Doble	6,954.98	9,090.91	0.65	V2
Vulcan	140C		Acción Diferencial	4,977.00	6,350.00	0.75	V3

Tabla 36: Características físicas y mecánicas de los martillos elegidos para el análisis y sus eficiencias mecánicas (Catálogos y fuentes señaladas anteriormente)

### 6.3. Eficiencia de transmisión de energía durante el impacto

Paralelamente a las magnitudes de la energía nominal y la eficiencia mecánica, la eficiencia de transmisión de energía del mazo (o martillo) hacia el pilote durante el impacto es de vital importancia. Este coeficiente, como se menciona en el capítulo 3, depende del tipo de cabezal y pilote que se esté utilizando durante el hincado. Además, la eficiencia de transmisión de energía depende mucho de la integridad del material del pilote, ya sea que este esté en buen o mal estado, y las condiciones de hincado, sean estas buenas o malas.

La magnitud de la eficiencia de transmisión de energía es definida por la ecuación

$$\eta = \frac{(W_M + e^2 W_P)}{(W_M + W_P)}$$

la cual depende esencialmente de los pesos del martillo y el pilote, así como un coeficiente definido como el coeficiente de restitución, el cual cuantifica cuánta energía es transferida de un material a otro. Este valor es determinado según las características físicas de los materiales y la facilidad de propagación de energía entrante a través de sus átomos.

En base a lo indicado anteriormente, se muestran a continuación algunas de las tantas combinaciones que existen para distintas condiciones y casos de hincado.

Coeficientes de restitución elegidos para el análisis				
e	Componentes del sistema de hincado			Fuente
	Pilote	Cabezal	Martillo	
0.55	Pilotes de acero	Acero	Cualquiera	Z. Davivian
0.50	Pilotes de acero	Acero	Acción doble	R. Chellis
		Cojín de madera verde o plástico	Acción doble	Simons y Menzies
			Acción simple, diésel o caída libre	
	Pilotes de concreto armado	Acero	Acción doble	R. Chellis
		Casco con cojín de madera verde o plástico		Simons y Menzies
		Cojín		
0.40	Pilotes de madera	Acero	Acción doble	R. Chellis
		Ninguno		Simons y Menzies
	Pilotes de acero	Acero	Acción doble	R. Chellis
		Madera	Cualquiera	
	Pilotes de concreto armado	Ninguno	Acción simple de caída libre	Simons y Menzies
		Acero	Cualquiera	
		Casco con cojín de plástico o madera verde encima y debajo del casco	Acción doble	
		Casco con cojín de madera verde o plástico	Acción simple, diésel o caída libre	
		Cojín	ICE	
		Cojín corto y casco		
0.30	Pilotes de acero	Cojín de madera con encaje	Acción doble	Simons y Menzies
			Acción simple, diésel o caída libre	
0.25	Pilotes de madera	Ninguno	Acción simple, diésel o caída libre	Simons y Menzies
		Madera (para pilotes de CA) o ninguno (para pilotes de madera)		R. Chellis
	Pilotes de concreto armado	Madera (para pilotes de CA) o ninguno (para pilotes de madera)		
		Casco con cojín de plástico o madera verde encima y debajo del casco		
		Casco y cojín en buenas condiciones		ICE
0.00	Pilotes de madera en malas condiciones	Ninguno	Acción simple y caída libre	ICE

Tabla 37: Coeficientes de restitución para diferentes condiciones y casos de hincado según diversos autores (R. Chellis 1971: Página 52; Z. Davidian 1977: Páginas 108-109; Civil Engineering Code of Practices Joint Committe 1954: Página 3, y Simons y Menzies 2001: Página 180)

Como se está considerando únicamente un tipo de cabezal para todos los casos, el coeficiente de restitución variaría esencialmente por el tipo de pilote y el tipo de martillo en uso. Eso por ello que los valores de los coeficientes de restitución utilizados en el análisis son los siguientes.

Coeficientes de restitución utilizados					
Pilotes de madera	Diésel	Hidráulico de acción simple	Vapor de acción simple	Vapor de acción doble	Vapor de acción diferencial
	0.25	0.25	0.25	0.40	0.40
Pilotes de acero	Diésel	Hidráulico de acción simple	Vapor de acción simple	Vapor de acción doble	Vapor de acción diferencial
	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Pilotes de concreto	Diésel	Hidráulico de acción simple	Vapor de acción simple	Vapor de acción doble	Vapor de acción diferencial
	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50

Tabla 38: Coeficientes de restitución utilizados en el análisis (Fuentes señaladas anteriormente)

Finalmente, al sumar todos los casos que serán considerados en el análisis desarrollado en el siguiente capítulo de este documento, se determinaron un total de 54 casos de pilotes con diferentes parámetros físicos y mecánicos en combinación con 5 tipos de martillos. Esto hace que el repertorio casuístico contenga 270 combinaciones con características diferentes que determinarán el comportamiento de los resultados de las 10 ecuaciones propuestas para el análisis. A continuación se presenta el análisis a través del cual se determinaron las penetraciones de cada uno de los 270 casos presentados en este proyecto.

## 7. Análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado de pilotes

Este capítulo consiste en mostrar la metodología de análisis que fue utilizada para evaluar las 10 ecuaciones de hincado con los 54 casos de pilotes y 5 martillos (en total 270 casos) definidos en el capítulo 6 de este documento. El proceso consistió en los siguientes pasos:

- i. Aislar y filtrar los casos cuyos parámetros se encuentren dentro de las restricciones que tiene cada ecuación. Es decir, cada autor o creador de la ecuación ha basado su investigación de acuerdo a ciertos parámetros (o quizás ninguno), por lo que en algunos casos existen tipos de pilotes o martillos que no fueron considerados para la elaboración de la fórmula. Por ejemplo, la ecuación del Engineering News Record indica que solo puede utilizarse para pilotes de madera y martillos hidráulicos y a vapor, por lo que solo se evaluaron los casos en acuerdo a esas limitaciones (H-1 a V3-18). Estos casos son identificados como valores “*Restricción*” y no formaron parte de la evaluación de los resultados.
- ii. Verificar que todas las variables que serán utilizadas en el análisis de las ecuaciones se encuentran en el sistema de unidades que recomienda cada una de las ecuaciones. Esto es sumamente importante, pues muchas de las ecuaciones, como la de Gates, tienen coeficientes numéricos ya establecidos en un sistema de unidades específico, el cual es el métrico, al igual que la ecuación de ENR, la cual se encuentra en el sistema imperial de unidades.
- iii. Asignar los valores, correspondientes a cada uno de los 270 casos, a las variables (como área de la sección del pilote, longitud, resistencia, energía nominal del martillo, entre otros) de cada ecuación a través de tablas dinámicas. Esta parte es esencialmente importante para variables como el coeficiente de restitución, ya que de este depende la eficiencia de transmisión de energía “ $\eta$ ” del proceso de hincado y cada una de las fórmulas tienen recomendaciones distintas para la magnitud de este valor. Por ejemplo, la ecuación de Eytelwein considera una colisión perfectamente elástica (o sea “ $e=0$ ”) y la ecuación de Goodrich recomienda que se analice el impacto como una colisión perfectamente elástica (o sea “ $e=1$ ”), a pesar de que la literatura claramente indica unos valores predeterminados para colisiones con diferentes materiales.
- iv. Definir los condicionantes de cada ecuación para determinar las variables dependientes de otras, como lo es la eficiencia de impacto “ $\eta$ ” y la variable de deformación “ $C_D$ ” de

la ecuación de Janbu. En el caso de la eficiencia de impacto, la ecuación que define el valor de “ $\eta$ ” tiene una cierta variación dependiendo de la magnitud de los pesos del martillo y pilote, como se definió en el marco teórico. En cuanto al coeficiente de deformación de la ecuación de Janbu “ $C_D$ ”, este depende de los pesos del martillo y pilote y, a su vez, define la variable “ $K_U$ ”, la cual tuvo que ser calculada en calculadora por las interdependencias que existen con el mismo valor de la penetración “ $s$ ”.

- v. Calcular las resistencias máximas de los pilotes “ $R_{MÁX}$ ” y, aplicando el factor de seguridad correspondiente, las resistencias máximas aplicables durante el hincado “ $R_H$ ”.
- vi. Definir las ecuaciones en las tablas dinámicas para poder obtener las penetraciones de los pilotes “ $s$ ” en base a los parámetros establecidos para cada caso.
- vii. Aislar y filtrar los valores de “ $s$ ” que resultan en magnitudes negativas. Estos casos se dieron en muchas ocasiones y, si bien no tienen ningún sentido lógico que la penetración sea una magnitud negativa, se les asignó la siguiente interpretación: “Todos aquellos valores de penetración “ $s$ ” igual o menor a cero corresponden a que se obtuvo el rechazo durante el proceso de hincado”. Esto quiere decir que, aquellos valores cuyas magnitudes fueron igual a cero o negativas no tuvieron penetración alguna, pues hubiera sido totalmente absurdo asumir que el pilote, en lugar de penetrar en el suelo, ascendiera verticalmente. Es por ello que todos los valores negativos pueden interpretarse como un condicionante matemático que representa el rechazo del pilote hacia el golpe del martillo. Estos valores se muestran en las tablas de resultados como valores “*Rechazo*” y no son incluidos dentro de la evaluación por su valor nulo.

El producto final de este capítulo fue un cuadro con todos los valores de las penetraciones obtenidas para un caso definido a través de cada ecuación. Es decir, si se hablara del pilote #12 (pilote de madera tropical peruana de sección rectangular) se obtendrían los resultados de “ $s$ ” para ese pilote en combinación con los 5 martillos y 10 ecuaciones propuestas en los capítulos anteriores. De esta manera, el cuadro tendrá los valores de las penetraciones obtenidas a través de las 10 ecuaciones de los casos *D-12*, *H-12*, *V1-12*, *V2-12* y *V3-12*. Adicional a los valores de “ $s$ ” mencionados, se calcularon, para cada combinación martillo-pilote, los siguientes parámetros estadísticos que permitieron evaluar los resultados obtenidos en el capítulo 8: media, valor máximo y mínimo, rango, desviación estándar y coeficiente de variación del grupo.

Abajo se muestra una de las tablas que fueron obtenidas durante este proceso, así como la representación gráfico de sus valores.

Penetraciones - Pilote de madera - Sección cuadrangular #12					
Ecuaciones	D-12	H-12	V1-12	V2-12	V3-12
Hiley	11.92	10.29	7.15	2.59	1.92
CEC	17.93	15.49	10.78	3.94	2.94
ENR	Restricción	32.60	25.29	10.86	8.92
Delmag	15.41	Restricción	Restricción	Restricción	Restricción
Bénabencq	20.73	20.67	17.03	8.55	6.12
Eytelwein	45.99	55.15	42.23	21.22	13.65
Goodrich	Restricción	5.71	Restricción	Restricción	Restricción
Gates	7.49	6.74	5.36	2.40	1.90
CUECP	25.48	22.19	15.91	6.73	5.39
Janbu	12.45	10.92	7.79	3.28	2.61
<b>Promedio (cm)</b>	<b>19.67</b>	<b>19.97</b>	<b>16.44</b>	<b>7.45</b>	<b>5.43</b>
<b>Máximo (cm)</b>	<b>45.99</b>	<b>55.15</b>	<b>42.23</b>	<b>21.22</b>	<b>13.65</b>
<b>Mínimo (cm)</b>	<b>7.49</b>	<b>5.71</b>	<b>5.36</b>	<b>2.40</b>	<b>1.90</b>
<b>Rango (cm)</b>	<b>38.50</b>	<b>49.44</b>	<b>36.87</b>	<b>18.82</b>	<b>11.75</b>
<b>Desviación estándar (cm)</b>	<b>12.01</b>	<b>15.72</b>	<b>12.31</b>	<b>6.34</b>	<b>4.13</b>
<b>Coefficiente de variación</b>	<b>0.61</b>	<b>0.79</b>	<b>0.75</b>	<b>0.85</b>	<b>0.76</b>

Tabla 39: Valores de las penetraciones “s” obtenidas a través de las 10 ecuaciones dinámicas de hincado y los parámetros del pilote #12 y los 5 martillos

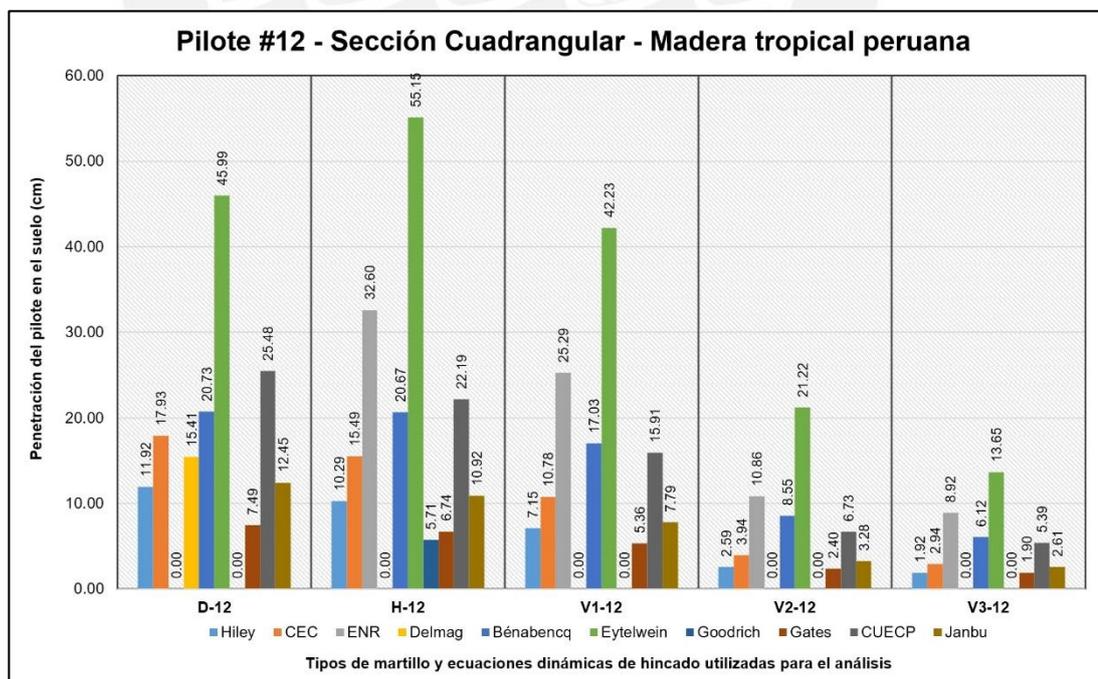


Gráfico 4: Valores de las penetraciones “s” obtenidas a través de las 10 ecuaciones dinámicas de hincado y los parámetros del pilote #12 y los 5 martillos

Tal y como se obtuvieron los resultados, a partir del procedimiento mostrado en listado líneas arriba, se obtuvieron los demás valores de las penetraciones “s” para cada caso y martillo propuesto en el capítulo 6.

De esta manera, a continuación, se muestran las particularidades del análisis de cada ecuación bajo los parámetros establecidos en esta investigación.

### 7.1. Análisis de la ecuación de Hiley

La ecuación de Hiley es uno de los casos más estándares que puede apreciarse en el listado de fórmulas de esta investigación, ya que la fórmula utiliza en su mayoría los teoremas físicos de manera inalterada y sin generar asunciones, como se muestra en el cálculo de la eficiencia de impacto y de la deformación del pilote. En el caso particular del cálculo de las deformaciones del cabezal y suelo, se eligió tomar los valores en base a un estudio empírico del manual de bolsillo del BSP (Simons y Menzies 2001: Página 181-182). Dicho esto, los valores no pertenecientes a las características de los pilotes son los siguientes:

- Eficiencia mecánica de los martillos: Elegido según los valores recomendados por los fabricantes y presentados en el capítulo 6.
- Coeficiente de restitución: Elegido según los valores recomendados por los fabricantes y presentados en el capítulo 6.
- Eficiencia de transmisión de energía durante el impacto: Calculado en base a las fórmulas presentadas en el capítulo 3 y condicionada a la relación de los pesos del pilote y martillo, así como al coeficiente de restitución elegido en base a los criterios señalados.
- Peso del pilote: Obtenido según la densidad (extraída de los catálogos y textos consultados) y el volumen del pilote (calculado para cada pilote en base a las dimensiones presentadas en el capítulo 6).
- Peso del martillo: Elegido en base a lo indicado en los catálogos de los fabricantes y textos geotécnicos consultados.
- Longitud al centro de resistencia: Dado que se ha asumido una transmisión de cargas del suelo al pilote de únicamente a través de fricción (sin contribución de la resistencia en la punta), el centro de resistencia del suelo sobre el pilote se encuentra en el centro geométrico del pilote, es decir, a la mitad de su longitud original.
- Factor de seguridad: En base a los textos consultados, el valor elegido para el factor de seguridad de esta ecuación fue 2.0.

- Compresión temporal en el pilote: Calculada en base a la ecuación de deformaciones de un sólido deformable de resistencia de materiales.
- Compresión temporal en el cabezal: Determinada en base al esfuerzo generado sobre el pilote y los materiales del pilote y cabezal.
- Compresión temporal del suelo: Determinada en base al esfuerzo generado sobre el pilote.

En el *Anexo 1* se pueden ver las tablas de cálculo que fueron utilizadas para la obtención de las penetraciones de los pilotes con la ecuación de Hiley.

## 7.2. Análisis de la ecuación del Código de Edificaciones Canadiense

La ecuación del Código de Edificaciones Canadiense, como dicho en el capítulo 4, es una variación de la fórmula de Hiley, por lo que tiene un criterio de elección de los valores de las variables no pertenecientes a las características de los pilotes idéntico a su antecesora. Sin embargo, las compresiones elásticas totales del sistema se calculan en base a una expresión análoga a la de la deformación elástica de un cuerpo deformable y no se consideran las deformaciones del cabezal y el suelo. Dicho esto, los valores no pertenecientes a las características de los pilotes son los siguientes:

- Eficiencia mecánica de los martillos: Elegido según los valores recomendados por los fabricantes y presentados en el capítulo 6.
- Coeficiente de restitución: Elegido según los valores recomendados por los fabricantes y presentados en el capítulo 6.
- Eficiencia de transmisión de energía durante el impacto: Calculado en base a las fórmulas presentadas en el capítulo 3 y condicionada a la relación de los pesos del pilote y martillo, así como al coeficiente de restitución elegido en base a los criterios señalados.
- Peso del pilote: Obtenido según la densidad (extraída de los catálogos y textos consultados) y el volumen del pilote (calculado para cada pilote en base a las dimensiones presentadas en el capítulo 6).
- Peso del martillo: Elegido en base a lo indicado en los catálogos de los fabricantes y textos geotécnicos consultados.
- Longitud al centro de resistencia: Dado que se ha asumido una transmisión de cargas del suelo al pilote de únicamente a través de fricción (sin contribución de la resistencia en la punta), el centro de resistencia del suelo sobre el pilote se

encuentra en el centro geométrico del pilote, es decir, a la mitad de su longitud original.

- Factor de seguridad: En base a los textos consultados, el valor elegido para el factor de seguridad de esta ecuación fue 3.0.
- Compresión temporal del sistema: Calculada en base a la longitud al centro de resistencias, el módulo de elasticidad del pilote y el esfuerzo generado por el martillo a lo largo de la sección del pilote, multiplicado por un coeficiente de 1.5.

En el *Anexo 1* se pueden ver las tablas de cálculo que fueron utilizadas para la obtención de las penetraciones de los pilotes con la ecuación del Código de Edificaciones Canadiense.

### 7.3. Análisis de la ecuación del Engineering News Record

La ecuación del Engineering News Record, es relativamente simple e incluye un coeficiente numérico que representa las compresiones elásticas temporales del sistema y cuya magnitud está relacionada al tipo de martillo que se utiliza durante el hincado. Esto significa que la metodología de cálculo de las compresiones elásticas a través de las ecuaciones y gráficos ya mostrados no aplica en este caso. Dicho esto, los valores no pertenecientes a las características de los pilotes son los siguientes:

- Eficiencia mecánica de los martillos: Elegido según los valores recomendados por los fabricantes y presentados en el capítulo 6.
- Coeficiente de restitución: Dado que la ecuación recomienda utilizar una eficiencia de transmisión de energía durante el impacto de 1.0, el coeficiente de restitución también deberá ser 1.0 para cumplir aquella condición numérica.
- Eficiencia de transmisión de energía durante el impacto: El autor de la fórmula asume que el valor de la eficiencia de impacto será igual a 1.0.
- Peso del pilote: Obtenido según la densidad (extraída de los catálogos y textos consultados) y el volumen del pilote (calculado para cada pilote en base a las dimensiones presentadas en el capítulo 6).
- Peso del martillo: Elegido en base a lo indicado en los catálogos de los fabricantes y textos geotécnicos consultados.
- Longitud al centro de resistencia: Dado que se ha asumido una transmisión de cargas del suelo al pilote de únicamente a través de fricción (sin contribución de la resistencia en la punta), el centro de resistencia del suelo sobre el pilote se encuentra en el centro geométrico del pilote, es decir, a la mitad de su longitud original.

- Factor de seguridad: En base a los textos consultados, el valor elegido para el factor de seguridad de esta ecuación fue 6.0.
- Compresión temporal del sistema: El autor propone utilizar los valores de 1.0”, 0.1” y  $0.1*(W_P/W_M)$  cuando se utilizan martillos de caída libre (hidráulicos), a vapor (acción simple, doble o diferencial) y martillos a vapor con pilotes muy pesados, respectivamente.

En el *Anexo 1* se pueden ver las tablas de cálculo que fueron utilizadas para la obtención de las penetraciones de los pilotes con la ecuación del Engineering News Record.

#### 7.4. Análisis de la ecuación de Delmag

Como dicho en el capítulo 4, esta fórmula fue creada por el fabricante de martillos Delmag y las variables involucradas, como la constante “c”, asumen valores sugeridos por el mismo. Además, esta ecuación solo puede ser utilizada con martillos de fabricación Delmag, por lo que existe una restricción considerable para los 270 resultados que en un inicio se obtendrían de esta ecuación. Para esta ocasión, de las 270 posibles penetraciones que se hubieran podido obtener, solo son válidas 54 (solo el 20%). Dicho esto, los valores que no pertenecen a las características de los pilotes son los siguientes:

- Eficiencia mecánica de los martillos: La ecuación en sí no muestra una expresión para la inclusión de este valor. Sin embargo, esto no quiere decir que no se incluya, pues el valor de la eficiencia mecánica para martillos diésel es de 1.0, por lo que no se muestra en la ecuación presentada en el capítulo 4.
- Coeficiente de restitución: En este caso, el coeficiente de restitución toma el valor de cero, en base a la ecuación presentada en el capítulo 4. Esto quiere decir que el choque fue completamente plástico, es decir, hubo pérdida de energía cinética durante el impacto en forma de deformación permanente.
- Eficiencia de transmisión de energía durante el impacto: Calculado en base a las fórmulas presentadas en el capítulo 3 y condicionada a la relación de los pesos del pilote y martillo, así como al coeficiente de restitución elegido en base a los criterios señalados.
- Peso del pilote: Obtenido según la densidad (extraída de los catálogos y textos consultados) y el volumen del pilote (calculado para cada pilote en base a las dimensiones presentadas en el capítulo 6).
- Peso del martillo: Elegido en base a lo indicado en los catálogos de los fabricantes y textos geotécnicos consultados.

- Longitud al centro de resistencia: En el caso particular de la ecuación de Delmag, el autor indica que se debe utilizar la longitud total del pilote para el cálculo de las compresiones en el pilote, a pesar de la teoría presentada en el marco teórico.
- Factor de seguridad: En base a los textos consultados, el valor elegido para el factor de seguridad de esta ecuación fue 2.5.
- Compresión temporal del sistema: Calculada en base a la longitud total del pilote y el coeficiente de elasticidad entre el pilote y el suelo “c”.

En el *Anexo 1* se pueden ver las tablas de cálculo que fueron utilizadas para la obtención de las penetraciones de los pilotes con la ecuación de Delmag.

### 7.5. Análisis de la ecuación de Bénabencq

La fórmula de Bénabencq consiste en una ecuación muy simple que se rige según el teorema de equivalencia de energía y trabajo: cuando se aplica cierta energía a un objeto inmóvil, esta puede ser transformada en energía de traslación, la cual está compuesta por un desplazamiento (en este caso “s”) y una fuerza ejercida a lo largo de todo el recorrido del movimiento (en este caso “ $R_H$ ”). Como se pudo ver en el capítulo 4, la presente fórmula no incluye expresiones de compresiones elásticas o pérdidas en el sistema de manera directa. Sin embargo, incluye un coeficiente igual a 2.00 el cual divide a la energía en la mitad, por lo que, indirectamente, el autor indica que habrá una transferencia de energía de solo el 50% de la magnitud inicial. Para comprender mejor lo anterior, la fórmula puede ser vista de la siguiente manera:

$$R_H * s = 0.5(E_N)$$

Dicho esto, los valores no pertenecientes a las características de los pilotes son los siguientes:

- Eficiencia mecánica de los martillos: El autor asume una eficiencia mecánica del 100% en todos los martillos.
- Coeficiente de restitución: Dado que el choque es interpretado como uno perfectamente elástico, el coeficiente de restitución es igual a 1.00.
- Eficiencia de transmisión de energía durante el impacto: Como el choque es perfectamente elástico y el coeficiente de restitución es igual a 1.00, la eficiencia de impacto también es 1.00.

- Peso del pilote: Obtenido según la densidad (extraída de los catálogos y textos consultados) y el volumen del pilote (calculado para cada pilote en base a las dimensiones presentadas en el capítulo 6).
- Peso del martillo: Elegido en base a lo indicado en los catálogos de los fabricantes y textos geotécnicos consultados.
- Longitud al centro de resistencia: Dado que se ha asumido una transmisión de cargas del suelo al pilote de únicamente a través de fricción (sin contribución de la resistencia en la punta), el centro de resistencia del suelo sobre el pilote se encuentra en el centro geométrico del pilote, es decir, a la mitad de su longitud original.
- Factor de seguridad: En base a los textos consultados, el valor elegido para el factor de seguridad de esta ecuación fue 6.0.
- Pérdidas en el sistema: Debido a la presencia del coeficiente 2.00, la pérdida de energía durante todo el proceso es del 50%. Esto puede interpretarse como la pérdida generada por la eficiencia del martillo, de impacto y compresiones en total. Por cuestiones de simplicidad matemática, los valores de las eficiencias fueron asumidos como 1, ya que no se muestran en la ecuación. Sin embargo, la conservación de energía no es perfecta.

En el *Anexo 1* se pueden ver las tablas de cálculo que fueron utilizadas para la obtención de las penetraciones de los pilotes con la ecuación de Bénabencq.

### 7.6. Análisis de la ecuación de Eytelwein

La ecuación de Eytelwein es similar a la de Bénabencq pero con la particularidad de que los pesos del martillo y pilote son considerados en el momento de realizar el equilibrio de fuerzas y energía. Esto se considera porque Eytelwein considera que el choque es perfectamente plástico, razón por la cual las dos masas viajan juntas. Dicho esto, los valores no pertenecientes a las características de los pilotes son los siguientes:

- Eficiencia mecánica de los martillos: El autor asume una eficiencia mecánica del 100% en todos los martillos.
- Coeficiente de restitución: Dado que el choque es interpretado como uno perfectamente plástico, el coeficiente de restitución es igual a cero.
- Eficiencia de transmisión de energía durante el impacto: Calculado en base a las fórmulas presentadas en el capítulo 3 y condicionada a la relación de los pesos del

pilote y martillo, así como al coeficiente de restitución elegido en base a los criterios señalados.

- Peso del pilote: Obtenido según la densidad (extraída de los catálogos y textos consultados) y el volumen del pilote (calculado para cada pilote en base a las dimensiones presentadas en el capítulo 6).
- Peso del martillo: Elegido en base a lo indicado en los catálogos de los fabricantes y textos geotécnicos consultados.
- Longitud al centro de resistencia: Dado que se ha asumido una transmisión de cargas del suelo al pilote de únicamente a través de fricción (sin contribución de la resistencia en la punta), el centro de resistencia del suelo sobre el pilote se encuentra en el centro geométrico del pilote, es decir, a la mitad de su longitud original.
- Factor de seguridad: En base a los textos consultados, el valor elegido para el factor de seguridad de esta ecuación fue 6.0.

En el *Anexo 1* se pueden ver las tablas de cálculo que fueron utilizadas para la obtención de las penetraciones de los pilotes con la ecuación de Eytelwein.

### 7.7. Análisis de la ecuación de Goodrich

Como fue mencionado en el capítulo 4, la ecuación de Goodrich tiene una restricción alta en cuanto al tipo de martillos y pilotes a utilizar (solo con martillos de caída libre o hidráulicos y pilotes de madera). En base a esto, los valores no pertenecientes a las características de los pilotes son los siguientes:

- Eficiencia mecánica de los martillos: El autor asume una eficiencia mecánica del 100% en todos los martillos.
- Coeficiente de restitución: Dado que el choque es interpretado como uno perfectamente elástico, el coeficiente de restitución es igual a 1.00.
- Eficiencia de transmisión de energía durante el impacto: Como el choque es perfectamente elástico y el coeficiente de restitución es igual a 1.00, la eficiencia de impacto también es 1.00.
- Peso del pilote: Obtenido según la densidad (extraída de los catálogos y textos consultados) y el volumen del pilote (calculado para cada pilote en base a las dimensiones presentadas en el capítulo 6).
- Peso del martillo: Elegido en base a lo indicado en los catálogos de los fabricantes y textos geotécnicos consultados.

- Longitud al centro de resistencia: Dado que se ha asumido una transmisión de cargas del suelo al pilote de únicamente a través de fricción (sin contribución de la resistencia en la punta), el centro de resistencia del suelo sobre el pilote se encuentra en el centro geométrico del pilote, es decir, a la mitad de su longitud original.
- Factor de seguridad: En base a los textos consultados, el valor elegido para el factor de seguridad de esta ecuación fue 3.0.
- Pérdidas en el sistema: Debido a la presencia del coeficiente 0.276, la pérdida de energía durante todo el proceso es del 72.4%. Esto puede interpretarse como la pérdida generada por la eficiencia del martillo, de impacto y compresiones en total. Por cuestiones de simplicidad matemática, los valores de las eficiencias fueron asumidos como 1, ya que no se muestran en la ecuación. Sin embargo, la conservación de energía no es perfecta.

En el *Anexo 1* se pueden ver las tablas de cálculo que fueron utilizadas para la obtención de las penetraciones de los pilotes con la ecuación de Goodrich.

#### 7.8. Análisis de la ecuación de Gates

Para la ecuación de Gates, la única restricción que existe es que para pilotes de madera, acero y concreto, existen versiones de la misma fórmula, por lo que deberán ser aplicadas de manera respectiva. De esta manera, los valores no pertenecientes a las características físicas y mecánicas de los pilotes son los siguientes:

- Eficiencia mecánica de los martillos: Elegido según los valores recomendados por los fabricantes y presentados en el capítulo 6.
- Coeficiente de restitución: Dado que el choque es interpretado como uno perfectamente elástico, el coeficiente de restitución es igual a 1.00.
- Eficiencia de transmisión de energía durante el impacto: Como el choque es perfectamente elástico y el coeficiente de restitución es igual a 1.00, la eficiencia de impacto también es 1.00.
- Peso del pilote: Obtenido según la densidad (extraída de los catálogos y textos consultados) y el volumen del pilote (calculado para cada pilote en base a las dimensiones presentadas en el capítulo 6).
- Peso del martillo: Elegido en base a lo indicado en los catálogos de los fabricantes y textos geotécnicos consultados.

- Longitud al centro de resistencia: Dado que se ha asumido una transmisión de cargas del suelo al pilote de únicamente a través de fricción (sin contribución de la resistencia en la punta), el centro de resistencia del suelo sobre el pilote se encuentra en el centro geométrico del pilote, es decir, a la mitad de su longitud original.
- Factor de seguridad: En base a los textos consultados, el valor elegido para el factor de seguridad de esta ecuación fue 3.0.

En el *Anexo 1* se pueden ver las tablas de cálculo que fueron utilizadas para la obtención de las penetraciones de los pilotes con la ecuación de Gates.

### 7.9. Análisis de la ecuación del Código Unificado de Edificaciones de la Costa del Pacífico

Como visto en el capítulo 4, las particularidades de la fórmula de hincado del CUECP asume que las pérdidas por compresiones elásticas en el sistema se limitan únicamente a la compresión elástica del pilote y que el autor asume valores independientes para el coeficiente de restitución del impacto. En base a ello, los valores no pertenecientes a las características de los pilotes son los siguientes:

- Eficiencia mecánica de los martillos: Elegido según los valores recomendados por los fabricantes y presentados en el capítulo 6.
- Coeficiente de restitución: El autor recomienda que se utilicen los valores de 0.25 para pilotes de acero y 0.10 para pilotes de concreto armado y de madera.
- Eficiencia de transmisión de energía durante el impacto: Calculado en base a las fórmulas presentadas en el capítulo 3 y condicionada a la relación de los pesos del pilote y martillo, así como al coeficiente de restitución elegido en base a los criterios señalados.
- Peso del pilote: Obtenido según la densidad (extraída de los catálogos y textos consultados) y el volumen del pilote (calculado para cada pilote en base a las dimensiones presentadas en el capítulo 6).
- Peso del martillo: Elegido en base a lo indicado en los catálogos de los fabricantes y textos geotécnicos consultados.
- Longitud al centro de resistencia: Dado que se ha asumido una transmisión de cargas del suelo al pilote de únicamente a través de fricción (sin contribución de la resistencia en la punta), el centro de resistencia del suelo sobre el pilote se encuentra en el centro geométrico del pilote, es decir, a la mitad de su longitud original.

- Factor de seguridad: En base a los textos consultados, el valor elegido para el factor de seguridad de esta ecuación fue 4.0.
- Compresión temporal del pilote: Calculada en base a la longitud al centro de resistencias, el módulo de elasticidad del pilote y el esfuerzo generado por el martillo a lo largo de la sección del pilote.

En el *Anexo 1* se pueden ver las tablas de cálculo que fueron utilizadas para la obtención de las penetraciones de los pilotes con la ecuación del Código Unificado de Edificaciones de la Costa del Pacífico.

#### 7.10. Análisis de la ecuación de Janbu

Esta fórmula no tiene ninguna particularidad, por lo que se asumen los valores estándar recomendados por los textos de geotecnia recomendados y los que fueron presentados en este documento. Dicho esto, los valores no pertenecientes a las características de los pilotes son los siguientes:

- Eficiencia mecánica de los martillos: Elegido según los valores recomendados por los fabricantes y presentados en el capítulo 6.
- Coeficiente de restitución: Elegido según los valores recomendados por los fabricantes y presentados en el capítulo 6.
- Eficiencia de transmisión de energía durante el impacto: Calculado en base a las fórmulas presentadas en el capítulo 3 y condicionada a la relación de los pesos del pilote y martillo, así como al coeficiente de restitución elegido en base a los criterios señalados.
- Peso del pilote: Obtenido según la densidad (extraída de los catálogos y textos consultados) y el volumen del pilote (calculado para cada pilote en base a las dimensiones presentadas en el capítulo 6).
- Peso del martillo: Elegido en base a lo indicado en los catálogos de los fabricantes y textos geotécnicos consultados.
- Longitud al centro de resistencia: Dado que se ha asumido una transmisión de cargas del suelo al pilote de únicamente a través de fricción (sin contribución de la resistencia en la punta), el centro de resistencia del suelo sobre el pilote se encuentra en el centro geométrico del pilote, es decir, a la mitad de su longitud original.
- Factor de seguridad: En base a los textos consultados, el valor elegido para el factor de seguridad de esta ecuación fue 3.0.

- Compresión temporal del sistema: Las pérdidas en el sistema se encuentran definidas por la variable  $K_U$ .

En el *Anexo 1* se pueden ver las tablas de cálculo que fueron utilizadas para la obtención de las penetraciones de los pilotes con la ecuación de Janbu.



## 8. Evaluación de los resultados

---

La principal diferencia entre el capítulo anterior y el presente es la interpretación de los resultados. Lo único que se presentó anteriormente fueron los resultados *crudos* de las penetraciones luego de introducir los casos en las ecuaciones propuestas. Si bien se han incluido, desde un inicio, aquellos casos en los que las fórmulas aplican restricciones sobre los parámetros de los martillos y pilotes indicados y los valores nulos, fue importante evaluar la calidad de los valores numéricos que se recibieron de las 10 ecuaciones y 270 casos propuestos. Esta evaluación consta de 9 partes, las cuales se listan a continuación:

- Evaluación de los valores numéricos recibidos del análisis de las ecuaciones dinámicas de hincado (del capítulo 7)
- Aplicación de la metodología estándar de filtración de datos y la obtención de los valores preliminares de las penetraciones para la evaluación
- Aplicación de la metodología de filtración adaptada a las propiedades de los casos en base a lo obtenido en la metodología de filtración estándar y la obtención de los valores finales de las penetraciones para la evaluación
- Ordenamiento de los casos evaluados en base a los resultados preliminares obtenidos
- Evaluación de la variación muestral de las magnitudes de las penetraciones de los casos evaluados
- Magnitudes de las penetraciones obtenidas y su relación con las características de los casos evaluados
- Afinidad de las ecuaciones a los casos martillo-pilote evaluados
- Tipos de valores obtenidos en los casos evaluados
- Evaluación del comportamiento integral de las curvas de penetraciones obtenidas de las ecuaciones dinámicas de hincado

Los detalles de estos análisis se pueden encontrar en el *Anexo 14*.

## 9. Conclusiones

---

### 9.1. Acerca de las penetraciones iniciales obtenidas

Dado a que los valores *crudos* obtenidos de las ecuaciones en cada caso resultaron ser muy dispersos entre sí (tal y como se evidenció en los valores de sus coeficientes de variación y las desviaciones estándares), se procedió a realizar un filtro de las penetraciones para obtener aquellas que se encuentren dentro de un rango admisible. Para lograr ello, se definió que el coeficiente de variación sería el parámetro principal bajo el cual se determinarían los valores aceptables y los descartables.

### 9.2. Acerca la metodología estándar de filtración

La metodología estándar de filtración consistió en filtrar las penetraciones de los casos en base a un valor fijo de “*K*” igual a 1.50 y 3 ciclos de filtración. Sin embargo, esta metodología solo proporcionó un 40.37% de casos con una dispersión aceptable bajo las condiciones de filtración propuestas, mientras que el 77.78%, 80.00% y 21.11% de los casos de madera, acero y concreto (respectivamente) obtuvieron variaciones muy altas. Es por ello que se vio la necesidad de crear la metodología de filtración adaptada, para complementar a la estándar y permitir que aquellos casos logren alcanzar dispersiones aceptables entre sus penetraciones. Dentro de los casos en los cuales tuvo aceptación esta metodología se observó una variación del número de ciclos de filtración entre 1 y 3 con un valor constante de “*K*” de 1.50.

### 9.3. Acerca de la metodología adaptada de filtración

El propósito principal de la metodología adaptada de filtración fue el de complementar la secuencia de filtración de la metodología estándar al brindar condiciones de selección más estrictos para poder cumplir con el requisito de dispersión de *CV* igual a 0.40. El proceso consistió en disminuir el valor de “*K*” y/o aumentar los ciclos de filtración a los que fuesen necesarios. En general, los valores de “*K*” variaron entre 0.95 y 1.50 mientras que los ciclos de filtración variaron entre 2 y 4. A través de esta metodología se determinó que las magnitudes de las dispersiones de las penetraciones en todos los casos aumentaron proporcionalmente a la magnitud de la variable “*R<sub>máx</sub>*”. Adicionalmente, se buscó no eliminar valores de manera innecesaria al permitir que el *CV* descienda de manera excesiva.

#### 9.4. Acerca de la variación muestral de las penetraciones de los casos evaluados

A manera de evitar que las variaciones entre las penetraciones sean excesivas, se estableció un límite de 0.40 para las magnitudes de los coeficientes de variación de los casos evaluados. Este valor logró controlar la dispersión *relativa*<sup>1</sup> entre las penetraciones de las ecuaciones.

Por lo general, en los casos de pilotes de madera, acero y concreto, en combinación con los 5 martillo de hincado, la dispersión entre las penetraciones aumentó mientras aumentaba el valor de " $R_{máx}$ ", por lo que se tuvo que ajustar bien los valores de " $K$ " y/o el número de los ciclos de filtración. Dentro de los casos evaluados, los que tuvieron pilotes de concreto armado pretensado fueron los que necesitaron en menor proporción el uso de la metodología adaptada de filtración, pues sus penetraciones resultaron encontrarse bastante próximas entre sí, en su mayoría (en total, el 78.89% de los casos de pilotes de concreto armado obtuvieron coeficientes de variación aceptables con la metodología estándar).

Por otro lado, los casos con valores de " $R_{máx}$ " y energía real suministrada bajas dieron como resultado valores de CV muy por encima del límite permisible debido a que la relación entre la desviación estándar y el promedio fue muy grande a causa de las magnitudes pequeñas de las penetraciones.

#### 9.5. Acero del ordenamiento de los casos evaluados

Los casos se ordenaron según las magnitudes de " $R_{máx}$ ", de menor a mayor valor, para de esa manera mitigar el número de irregularidades presentes en el decrecimiento de las magnitudes de las penetraciones, el cual no fue uniforme para las ecuaciones de Hiley, CEC, Delmag, CUECP y Janbu.

La otra alternativa de ordenamiento de los casos fue según el peso de los pilotes. No obstante, esta opción no fue la más adecuada pues, en los casos de los pilotes de acero y concreto, siempre 3 casos tuvieron el mismo peso. Paralelamente, cuando se intentó ordenar los casos según el peso de los pilotes, el número de irregularidades en el decrecimiento de las penetraciones aumentaba. Estas dos fueron las razones por las cuales no se optó por aquella opción.

---

<sup>1</sup> Se pone énfasis en la palabra *relativa* pues el CV depende de la relación entre la desviación estándar y el promedio muestral del grupo de penetraciones. Por lo que, si se tiene un grupo de penetraciones de magnitudes pequeñas, el valor de CV relativo podría ser alto, pero el valor del CV absoluto, el cual toma en cuenta la separación absoluta entre un valor y otro, podría ser bastante bajo. Este concepto solo se aprecia de manera cualitativa dentro del presente proyecto de investigación.

### **9.6. Acerca de la afinidad de las ecuaciones a los casos de pilotes de madera latifoliada peruana**

Las ecuaciones de Hiley, CEC, Delmag (solo para los casos hincados con martillo diésel), Bénabencq (solo en los casos hincados con martillo D), Goodrich (solo para los casos hincados con martillo hidráulico), Gates, CUECP (solo en los casos hincados con martillo diésel, pues se obtuvieron afinidades pobre en los casos hincados con V2 y V3 y ninguna en aquellos hincados con H y V1) y Janbu obtuvieron afinidades aceptables a los casos de pilotes de madera hincados con los 5 martillos propuestos, siendo Hiley, CEC y Gates las únicas de aquellas expresiones matemáticas que lograron obtener afinidades del 100.00% en los casos evaluados. Por el contrario, la ecuación de ENR generó valores que fueron descartados en su totalidad (se incluyen los casos hincados con el martillo diésel que tuvieron restricción por el uso de aquel dispositivo de hincado) y las penetraciones obtenidas a través de la ecuación de Eytelwein fueron descartadas por completo por tener magnitudes muy por encima de los límites admisibles.

### **9.7. Acerca de la afinidad de las ecuaciones a los casos de pilotes de acero estructural**

Las ecuaciones de ENR y Goodrich no fueron aptas debido a un 100.00% de casos con restricción y las de Eytelwein y CUECP obtuvieron penetraciones que fueron descartadas por completo. Sin embargo, las ecuaciones de Bénabencq, Delmag, Hiley, CEC y Janbu mostraron afinidades parciales a los casos de pilotes de acero estructural hincados con los 5 martillos propuestos. Sobre todo, se mostró afinidad en los casos con valores de " $W_P$ " y " $R_{máx}$ " bajos a intermedios. Por último, la ecuación de Gates fue la única que obtuvo una afinidad casi perfecta a los casos de pilotes de acero (con la excepción de la penetración obtenida en el caso H-28, que fue descartada).

### **9.8. Acerca de la afinidad de las ecuaciones a los casos de pilotes de concreto armado pretensado**

La ecuación de Gates fue la única que mostro afinidad total a los casos de pilotes de concreto armado pretensado hincados con los 5 martillos propuestos. Además, las ecuaciones de Hiley, CEC, Delmag, CUECP y Janbu mostraron afinidad a gran parte de los casos evaluados. Por otro lado, las ecuaciones de ENR y Goodrich tuvieron restricciones para el uso de pilotes de concreto, por lo que resultaron no aptas por

restricción, y las penetraciones obtenidas de las fórmulas de Bénabencq y Eytelwein fueron descartadas por completo para todos los martillos.

### 9.9. Acerca de los tipos de valores obtenidos en los casos de pilotes de madera tropical peruana

- Para los casos hincados con martillo diésel (D), las ecuaciones de Hiley, CEC, Delmag, Gates y Janbu lograron obtener afinidades perfectas. No se observaron valores con rechazo y las dispersiones aumentaron proporcionalmente con el valor de “ $R_{m\acute{a}x}$ ”.
- Para los casos hincados con martillo hidráulico (H), las ecuaciones que obtuvieron penetraciones aptas en la totalidad de casos fueron las de Hiley, CEC, Gates y Janbu, lo cual confirma la afinidad de estas ecuaciones a este tipo de parámetros. No hubieron valores con rechazo en ningún caso.
- Para los casos hincados con martillo a vapor de acción simple (V1), las ecuaciones que obtuvieron penetraciones aptas en la totalidad de casos fueron las de Hiley, CEC, Gates y Janbu, lo cual confirma la afinidad de estas ecuaciones a este tipo de parámetros. No hubieron valores con rechazo en ningún caso.
- Para los casos hincados con martillo a vapor de acción doble (V2), las ecuaciones que obtuvieron penetraciones aptas en la totalidad de casos fueron las de Hiley, CEC y Gates. Además, a partir de  $R_{m\acute{a}x} \geq 307,321.39 \text{ kg}$ , las ecuaciones de CEC y Hiley empezaron a dar rechazo.
- Para los casos hincados con martillo a vapor de acción diferencial (V3), las únicas ecuaciones que obtuvieron penetraciones aptas en la totalidad de casos fueron las de Hiley, CEC y Gates. Por último, a partir de  $R_{m\acute{a}x} \geq 239,228.72 \text{ kg}$ , las ecuaciones de CEC y Hiley empezaron a dar rechazo (con la excepción del caso V3-6, pues la relación “ $W_M / W_P$ ” fue menor a la de los casos V3-18, V3-8 y V3-9).

#### 9.10. Acerca de los tipos de valores obtenidos en los casos de pilotes de acero estructural

- Para los casos hincados con martillo diésel (D), la ecuación de Gates fue la única que obtuvo valores aptos en la totalidad de estos. Por otro lado, dentro del rango  $R_{m\acute{a}x} \in [428,605.45 ; 513,660.74] \text{kg}$ , existieron variaciones debido a que la ecuación de Delmag empezó a dar valores de rechazo. Esto se dio debido a las combinaciones de “ $W_P$ ” y “ $R_{m\acute{a}x}$ ”, así como a la relación “ $W_M / W_P$ ”. En cuanto a la aparición general de valores rechazo que si fueron tomados en cuenta para la evaluación, estos surgieron a partir de  $R_{m\acute{a}x} \geq 800,344.40 \text{ kg}$  en las ecuaciones de Hiley, Delmag y CEC.
- Para los casos hincados con martillo hidráulico (H), ninguna ecuación logró tener afinidad completa. Las ecuaciones de Hiley y CEC obtuvieron valores rechazo a partir de  $R_{m\acute{a}x} \geq 898,857.00 \text{ kg}$ .
- Para los casos hincados con martillo a vapor de acción simple (V1), la ecuación de Gates fue la única que obtuvo valores aptos en la totalidad de escenarios. Por otro lado, la aparición de valores con rechazo se dio a partir de  $R_{m\acute{a}x} \geq 800,344.40 \text{ kg}$ .
- Para los casos hincados con martillo a vapor de acción doble (V2), las ecuaciones de Gates y Janbu fueron las únicas que lograron obtener una afinidad completa a los parámetros en los casos. Por otro lado, la aparición de valores con rechazo se dio a partir de  $R_{m\acute{a}x} \geq 800,344.40 \text{ kg}$ .
- Para los casos hincados con martillo a vapor de acción diferencial (V3), al igual que para los casos hincados con el martillo V2, las únicas ecuaciones que obtuvieron afinidad completa fueron la de Gates y Janbu, con la diferencia que Janbu tuvo 2 valores de rechazo. Adicionalmente, las ecuaciones de Hiley y CEC comenzaron a dar rechazo a partir de  $R_{m\acute{a}x} \geq 800,344.40 \text{ kg}$ .

#### 9.11. Acerca de los tipos de valores obtenidos en los casos de pilotes de concreto armado pretensado

- Para los casos hincados con martillo diésel (D), las ecuaciones que alcanzaron afinidad completa a estos fueron las de CEC, Gates y Janbu. No hubieron valores con rechazo en ninguno de los casos.

- Para los casos hincados con martillo hidráulico (H), las ecuaciones de Hiley, CEC, Gates y Janbu lograron alcanzar afinidad completa. Ninguno de los casos tuvo valores con rechazo.
- Para los casos hincados con martillo a vapor de acción simple (V1), las ecuaciones de Hiley, CEC y Gates lograron alcanzar afinidad completa. A partir de  $R_{m\acute{a}x} \geq 1'225,279.62 \text{ kg}$  las ecuaciones de Hiley y CEC empezaron a dar valores con rechazo.
- Para los casos hincados con martillo a vapor de acción doble (V2), solo las ecuaciones de Hiley, CEC y Gates pudieron alcanzar completa afinidad, con el detalle que Hiley y CEC empezaron a tener rechazo a partir de  $R_{m\acute{a}x} \geq 836,177.30 \text{ kg}$  y  $R_{m\acute{a}x} \geq 952,995.26 \text{ kg}$ , respectivamente.
- Para los casos hincados con martillo a vapor de acción diferencial (V3), las ecuaciones de Hiley, CEC, Gates y Janbu pudieron alcanzar completa afinidad. A partir de un valor de  $R_{m\acute{a}x} \geq 1'225,279.62 \text{ kg}$ , todas las ecuaciones válidas (Hiley, CEC, Gates y Janbu) dieron rechazo para los casos de pilotes de concreto armado pretensado.

#### 9.12. Acerca del comportamiento de las penetraciones de las ecuaciones y la tendencia de las curvas pertenecientes a los casos de pilotes de madera tropical (latifoliada) peruana

- Desde un punto de vista general, solo las curvas de Bénabencq, Goodrich y Gates no tuvieron irregularidades geométricas relacionadas con el decrecimiento no uniforme de las penetraciones. En cambio, las ecuaciones de Hiley, CEC, Delmag, CUECP y Janbu si presenciaron incongruencias de aquel tipo.
- La proximidad de los valores obtenidos de las ecuaciones dinámicas a los valores promedio de los casos fue considerada una parte vital de la evaluación de los resultados, pues indicó cuán confiables fueron aquellas fórmulas entre las 10 presentadas. Entre las más próximas se encontraron las siguientes ecuaciones:
  - Para los casos de pilotes de madera tropical hincados con martillo diésel (D), las ecuaciones de **Delmag** y **Janbu** tuvieron proximidades marcadas

a la curva del promedio para los rangos de  $R_{\text{máx}} \leq 205,000.00 \text{ kg}$  y  $R_{\text{máx}} > 205,000.00 \text{ kg}$ , respectivamente.

- Para los casos de pilotes de madera tropical hincados con martillo hidráulico (H), las curvas de las ecuaciones de **Janbu** y **Hiley** fueron las más próximas a la curva de la media para los rangos de  $R_{\text{máx}} \leq 800,000.00 \text{ kg}$  y  $R_{\text{máx}} > 800,000.00 \text{ kg}$ , respectivamente.
- Para los casos de pilotes de madera tropical hincados con martillo a vapor de acción simple (V1), las penetraciones de las ecuaciones de **Janbu** y **Hiley** fueron las más próximas a los valores promedio de los casos evaluados para los intervalos de  $R_{\text{máx}} \leq 210,702.69 \text{ kg}$  y  $R_{\text{máx}} > 210,702.69 \text{ kg}$ , respectivamente.
- Para los casos de pilotes de madera tropical hincados con martillo a vapor de acción doble (V2), las curvas de **CEC**, **Janbu** y **Hiley** fueron las más próximas al promedio de las 10 presentadas dentro de los rangos de “ $R_{\text{máx}}$ ” siguientes, respectivamente:  $R_{\text{máx}} \leq 97,823.44 \text{ kg}$ ,  $R_{\text{máx}} \in ]97,823.44 ; 140,865.75] \text{ kg}$  y  $R_{\text{máx}} > 140,685.75 \text{ kg}$ .
- Para los casos de pilotes de madera tropical hincados con martillo a vapor de acción diferencial (V3), las curvas de **CEC** y **Janbu** fueron las más cercanas a la del promedio dentro de los rangos  $R_{\text{máx}} \leq 96,579.00 \text{ kg}$  (CEC),  $R_{\text{máx}} > 145,000.00 \text{ kg}$  (CEC) y  $R_{\text{máx}} \in ]96,579.00 ; 145,000.00] \text{ kg}$  (Janbu).

En resumen, la ecuación de Janbu predominó al tener valores más cercanos a los del promedio para todos los martillos evaluados, mientras que Hiley y CEC fueron muy cercanas a la curva de la media para los casos hincados con martillos H, V1 y V2, en el caso de Hiley, y V2 y V3, en el caso de CEC).

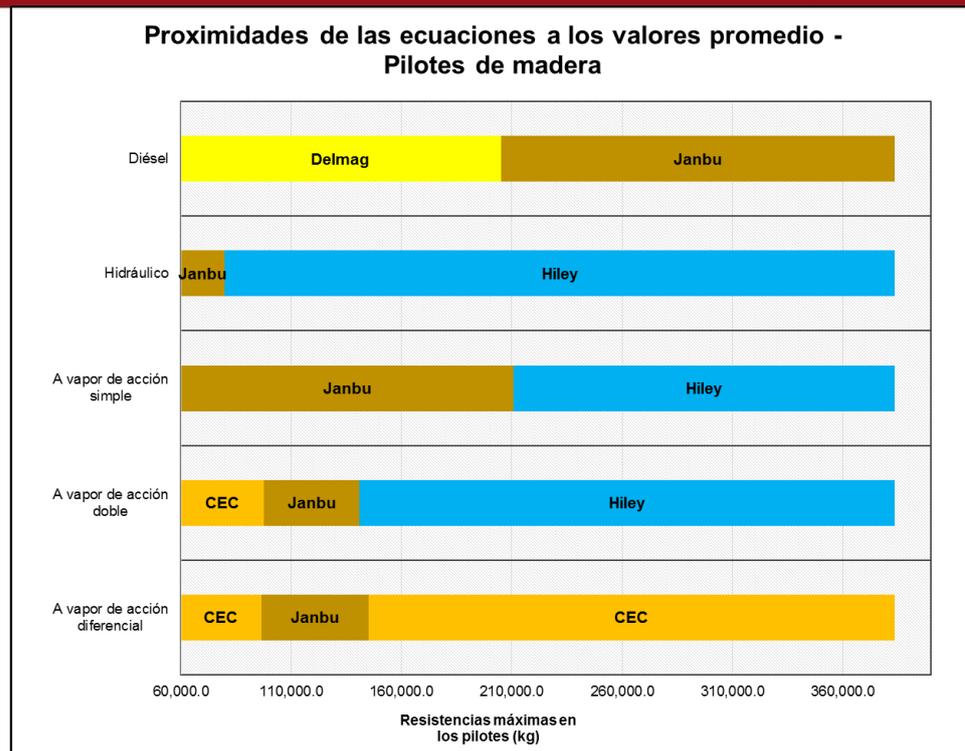


Gráfico 5: Ecuaciones más próximas a la curva de la media a lo largo de los valores de  $R_{máx}$  para los casos de pilotes de madera hincados con los 5 martillos evaluados (Fuente propia)

- Paralelamente a la proximidad de las penetraciones de las ecuaciones a los valores promedio, se evaluó la proximidad entre los valores de las 10 ecuaciones, los cuales dieron indicios de tendencias similares o no a la de la curva promedio. Esta evaluación fue importante ya que existió la posibilidad de que una o más curvas de las ecuaciones estudiadas representen una estimación correcta de la penetración de un pilote, de ciertas propiedades, hincado con un determinado martillo, en lugar del promedio. Las conclusiones de esta parte de la evaluación fueron las siguientes:
  - Para los casos de pilotes de madera tropical hincados con martillo diésel (D), las penetraciones de las curvas de **Hiley** y **Janbu** fueron muy próximas entre sí a lo largo de todos los valores de " $R_{máx}$ " (con separaciones menores a 0.57 cm entre sus valores), así como las de las ecuaciones de **CEC** y **Delmag** a partir de  $R_{máx} \geq 300,000.00$  kg (con separaciones no mayores a 0.49 cm).
  - Para los casos de pilotes de madera tropical hincados con martillo hidráulico (H), las penetraciones de **Hiley** y **Janbu** fueron las que mayor cercanía tuvieron entre sí a lo largo de todos los valores de " $R_{máx}$ " y con separaciones no mayores a 0.69 cm.

- Para los casos de pilotes de madera tropical hincados con martillo a vapor de acción simple (V1), las curvas de **Hiley** y **Janbu**, así como las de **CEC** y **Janbu**, fueron las más próximas entre sí para los rangos de  $R_{m\acute{a}x} < 240,000.00 \text{ kg}$  (con separaciones menores a 0.71 cm) y  $R_{m\acute{a}x} \geq 240,000.00 \text{ kg}$  (con separaciones menores a 0.69 cm), respectivamente.
- Para los casos de pilotes de madera tropical hincados con martillo a vapor de acción doble (V2), las curvas de **Hiley** y **Gates** fueron las que se aproximaron más entre sí a lo largo de todos los valores de " $R_{m\acute{a}x}$ " y con separaciones no mayores a 0.32 cm.
- Para los casos de pilotes de madera tropical hincados con martillo a vapor de acción diferencial (V3), nuevamente, las curvas de **Hiley** y **Gates** fueron las que se aproximaron más entre sí a lo largo de todos los valores de " $R_{m\acute{a}x}$ " y con separaciones no mayores a 0.35 cm.

### 9.13. Acerca del comportamiento de las penetraciones de las ecuaciones y la tendencia de las curvas pertenecientes a los casos de pilotes de acero estructural

- Desde un punto de vista general, solo las curvas de Bénabencq y Gates no tuvieron irregularidades geométricas relacionadas con el decrecimiento no uniforme de las penetraciones. En cambio, las ecuaciones de Hiley, CEC, Delmag, CUECP y Janbu sí presenciaron incongruencias de aquel tipo.
- La proximidad de los valores obtenidos de las ecuaciones dinámicas a los valores promedio de los casos fue considerada una parte vital de la evaluación de los resultados, pues indicó cuán confiables fueron aquellas fórmulas entre las 10 presentadas. Entre las más próximas se encontraron las siguientes ecuaciones:
  - En la situación particular de los casos de pilotes de acero estructural hincados con martillo diésel (D), no se pudo definir claramente una o más ecuaciones que hayan permanecido próximas a la curva del promedio de manera representativa. La alta variación de las penetraciones impidió que esta parte de la evaluación se lleve a cabo de manera concreta.
  - Para los casos de pilotes de acero estructural hincados con martillo hidráulico (H), hubieron varias combinaciones de curvas de ecuaciones que estuvieron cercanas a la del promedio en intervalos consecutivos. Estas combinaciones son las siguientes:

- **Hiley y Janbu** hasta  $R_{m\acute{a}x} \leq 225,289.80$  kg
  - **CEC y Gates** dentro de  $R_{m\acute{a}x} \in ]225,289.80 ; 381,510.00]$ kg
  - **Gates y Janbu** dentro de  $R_{m\acute{a}x} \in ]381,510.00 ; 870,000.00]$ kg
  - **Hiley y CEC** dentro de  $R_{m\acute{a}x} > 870,000.00$  kg
- Para los casos de pilotes de acero estructural hincados con martillo hidráulico (V1), hubieron varias combinaciones de curvas de ecuaciones que estuvieron cercanas a la del promedio en intervalos consecutivos. Estas combinaciones son las siguientes:
- **Hiley y Janbu** hasta  $R_{m\acute{a}x} \leq 200,000.00$  kg
  - **CEC, Gates y Janbu** dentro de  $R_{m\acute{a}x} \in ]200,000.00 ; 234,638.37]$ kg
  - **Gates y Janbu** dentro de  $R_{m\acute{a}x} \in ]234,638.37 ; 800,000.00]$ kg
  - **Hiley y CEC** dentro de  $R_{m\acute{a}x} > 800,000.00$  kg
- Para los casos de pilotes de acero estructural hincados con martillo hidráulico (V2), hubieron varias combinaciones de curvas de ecuaciones que estuvieron cercanas a la del promedio en intervalos consecutivos. Estas combinaciones son las siguientes:
- Nada significativo hasta  $R_{m\acute{a}x} \leq 187,984.85$  kg
  - **Gates y Janbu** dentro de  $R_{m\acute{a}x} \in ]187,984.85 ; 800,000.00]$ kg
  - **Hiley y CEC** desde de  $R_{m\acute{a}x} \geq 800,000.00$  kg
- Para los casos de pilotes de acero estructural hincados con martillo hidráulico (V2), hubieron varias combinaciones de curvas de ecuaciones que estuvieron cercanas a la del promedio en intervalos consecutivos. Estas combinaciones son las siguientes:
- **Gates y Janbu** hasta  $R_{m\acute{a}x} \leq 800,000.00$  kg
  - **Hiley y CEC** desde  $R_{m\acute{a}x} > 800,000.00$  kg

En resumen, las ecuaciones de Gates y Janbu predominaron al tener valores más cercanos a los del promedio para todos los martillos evaluados en los casos con “ $R_{m\acute{a}x}$ ” pequeños a intermedios. Para los valores de “ $R_{m\acute{a}x}$ ” de intermedios a altos, las ecuaciones de Hiley y CEC fueron muy cercanas a la curva de la media.

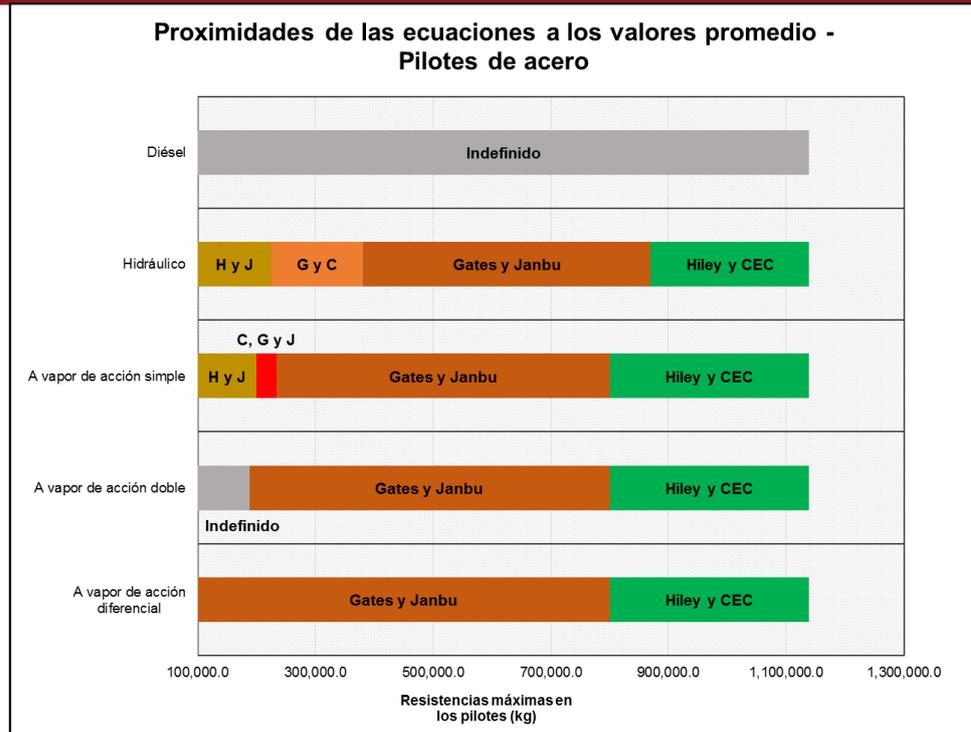


Gráfico 6: Ecuaciones más próximas a la curva de la media a lo largo de los valores de  $R_{m\acute{a}x}$  para los casos de pilotes de acero hincados con los 5 martillos evaluados (Fuente propia)

- Paralelamente a la proximidad de las penetraciones de las ecuaciones a los valores promedio, se evaluó la proximidad entre los valores de las 10 ecuaciones, los cuales dieron indicios de tendencias similares o no a la de la curva promedio. Esta evaluación fue importante ya que existió la posibilidad de que una o más curvas de las ecuaciones estudiadas representen una estimación correcta de la penetración de un pilote, de ciertas propiedades, hincado con un determinado martillo, en lugar del promedio. Las conclusiones de esta parte de la evaluación fueron las siguientes:
  - Para los casos de pilotes de acero estructural hincados con martillo diésel (D), hubieron diferentes combinaciones de ecuaciones cuyas penetraciones estuvieron cercas las unas de las otras durante intervalos distintos. Estas combinaciones fueron las siguientes:
    - **Hiley y CEC desde  $R_{m\acute{a}x} \geq 245,000.00$  kg**
    - **Hiley y Janbu hasta  $R_{m\acute{a}x} \leq 225,289.80$  kg**
    - **Delmag y Janbu hasta  $R_{m\acute{a}x} \leq 513,660.74$  kg**
    - **Gates y Janbu dentro de  $R_{m\acute{a}x} \in [380,000.00 ; 800,000.00]$ kg**
  - Para los casos de pilotes de acero estructural hincados con martillo hidráulico (H), hubieron diferentes combinaciones de ecuaciones cuyas

penetraciones estuvieron cercas las unas de las otras durante intervalos distintos. Estas combinaciones fueron las siguientes:

- **Hiley y Janbu** hasta  $R_{m\acute{a}x} \leq 187,984.85 \text{ kg}$
  - **CEC y Janbu** dentro de  $R_{m\acute{a}x} \in [187,984.85 ; 234,638.37] \text{kg}$
  - **Gates y Janbu** dentro de  $R_{m\acute{a}x} \in [234,638.37 ; 800,344.40] \text{kg}$
- Para los casos de pilotes de acero estructural hincados con martillo a vapor de acción simple (V1), hubieron diferentes combinaciones de ecuaciones cuyas penetraciones estuvieron cercas las unas de las otras durante intervalos distintos. Estas combinaciones fueron las siguientes:
- **CEC y Janbu** dentro de  $R_{m\acute{a}x} \in [187,984.85 ; 225,289.80] \text{kg}$
  - **Gates y Janbu** hasta  $R_{m\acute{a}x} \leq 513,660.74 \text{ kg}$
- Para los casos de pilotes de acero estructural hincados con martillo a vapor de acción doble (V2), las curvas de **Gates y Janbu** fueron las que se aproximaron más entre sí a partir de  $R_{m\acute{a}x} \geq 187,984.85 \text{ kg}$ , siendo las diferencias no mayores a 0.56 cm.
- Para los casos de pilotes de acero estructural hincados con martillo a vapor de acción diferencial (V3), nuevamente, las curvas de **Gates y Janbu** fueron las que se aproximaron más entre sí dentro del rango de  $R_{m\acute{a}x} \in [187,984.85 ; 800,000.00] \text{kg}$ , siendo las diferencias no mayores a 0.31 cm. A partir de  $R_{m\acute{a}x} > 800,000.00 \text{ kg}$ , las curvas de Gates y Janbu se aproximaron a las de Hiley y CEC con separaciones no mayores a 0.19 cm.

#### 9.14. Acerca del comportamiento de las penetraciones de las ecuaciones y la tendencia de las curvas pertenecientes a los casos de pilotes de concreto armado pretensado

- Desde un punto de vista general, solo la curva de Gates no tuvo irregularidades geométricas relacionadas con el decrecimiento no uniforme de las penetraciones. En cambio, las ecuaciones de Hiley, CEC, Delmag, CUECP y Janbu si presenciaron incongruencias de aquel tipo.
- La proximidad de los valores obtenidos de las ecuaciones dinámicas a los valores promedio de los casos fue considerada una parte vital de la evaluación de los resultados, pues indicó cuán confiables fueron aquellas fórmulas entre las 10 presentadas. Entre las más próximas se encontraron las siguientes ecuaciones:

- Para los casos de pilotes de concreto armado pretensado hincados con martillo diésel (D), las curvas de **Gates** y **CEC**, así como las de **Hiley**, **Janbu** y **Delmag** se aproximaron marcadamente al gráfico de la media en los intervalos de  $R_{m\acute{a}x} \leq 650,000.00 \text{ kg}$  y  $R_{m\acute{a}x} > 650,000.00 \text{ kg}$ , respectivamente.
- Para los casos de pilotes de concreto armado pretensado hincados con martillo hidráulico (H), la curva de la ecuación de **CEC** fue la más próxima a la curva de la media hasta  $R_{m\acute{a}x} \leq 668,941.84 \text{ kg}$ . A partir de ese valor, todas las curvas de las ecuaciones disponibles se encontraron próximas al promedio.
- Para los casos de pilotes de concreto armado pretensado hincados con martillo a vapor de acción simple (V1), las curvas de la ecuación de **CEC** y **Gates** fueron las más próximas a la curva de la media a lo largo de todos los valores de " $R_{m\acute{a}x}$ ". Asimismo, a partir de  $R_{m\acute{a}x} \geq 600,000.00 \text{ kg}$ , el resto de ecuaciones disponibles se aproximaron más a la curva del promedio.
- Para los casos de pilotes de concreto armado pretensado hincados con martillo a vapor de acción doble (V2), hubieron varias combinaciones de curvas de ecuaciones que estuvieron cercanas a la del promedio en intervalos consecutivos. Estas combinaciones son las siguientes:
  - **CEC y Gates** hasta  $R_{m\acute{a}x} \leq 340,000.00 \text{ kg}$
  - **Gates y Janbu** dentro de  $R_{m\acute{a}x} \in ]340,000.00 ; 580,000.00] \text{kg}$
  - **Hiley y Janbu** dentro de  $R_{m\acute{a}x} \in ]580,000.00 ; 668,000.00] \text{kg}$
  - **Todas** a partir de  $R_{m\acute{a}x} > 668,000.00 \text{ kg}$
- Para los casos de pilotes de concreto armado pretensado hincados con martillo a vapor de acción diferencial (V3), las curvas de **CEC**, **Gates** y **todas** (a partir de  $R_{m\acute{a}x} \geq 952,995.26 \text{ kg}$ ) fueron las más cercanas a la del promedio dentro de los rangos  $R_{m\acute{a}x} < 527,601.81 \text{ kg}$  (CEC),  $R_{m\acute{a}x} \in ]527,601.81 ; 952,995.26] \text{kg}$  (Gates) y  $R_{m\acute{a}x} \geq 952,995.26 \text{ kg}$  (todas).

En resumen, las ecuaciones de Gates y CEC predominaron al tener valores más cercanos a los del promedio para todos los martillos evaluados (menos H) en los casos con " $R_{m\acute{a}x}$ " pequeños a intermedios. Para los valores de " $R_{m\acute{a}x}$ " de intermedios a altos, las ecuaciones de Hiley y Janbu, así como generalmente todas, fueron muy cercanas a la curva de la media.

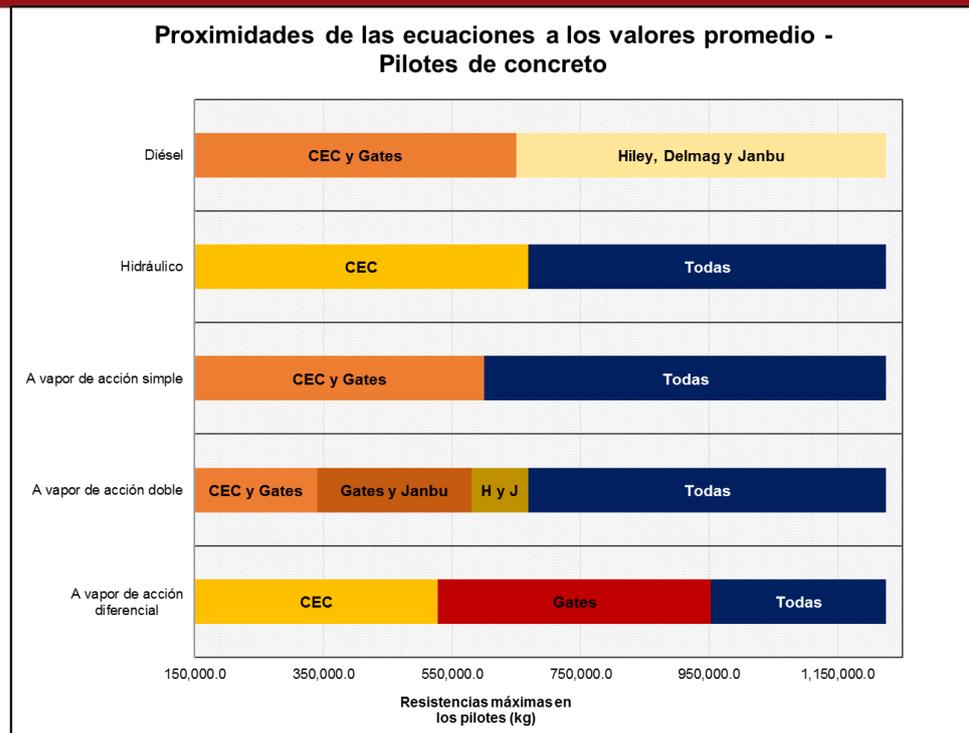


Gráfico 7: Ecuaciones más próximas a la curva de la media a lo largo de los valores de  $R_{máx}$  para los casos de pilotes de concreto hincados con los 5 martillos evaluados (Fuente propia)

- Paralelamente a la proximidad de las penetraciones de las ecuaciones a los valores promedio, se evaluó la proximidad entre los valores de las 10 ecuaciones, los cuales dieron indicios de tendencias similares o no a la de la curva promedio. Esta evaluación fue importante ya que existió la posibilidad de que una o más curvas de las ecuaciones estudiadas representen una estimación correcta de la penetración de un pilote, de ciertas propiedades, hincado con un determinado martillo, en lugar del promedio. Las conclusiones de esta parte de la evaluación fueron las siguientes:
  - Para los casos de pilotes de concreto armado pretensado hincados con martillo diésel (D), hubieron diferentes combinaciones de ecuaciones cuyas penetraciones estuvieron cercas las unas de las otras durante intervalos distintos. Estas combinaciones fueron las siguientes:
    - **Hiley, Delmag y Janbu** a partir de  $R_{máx} \geq 350,000.00$  kg
    - **Gates y CEC** a partir de  $R_{máx} \geq 400,000.00$  kg
  - Para los casos de pilotes de concreto armado pretensado hincados con martillo hidráulico (H), hubieron diferentes combinaciones de ecuaciones cuyas penetraciones estuvieron cercas las unas de las otras durante intervalos distintos. Estas combinaciones fueron las siguientes:

- **Hiley y Janbu** a lo largo de todos los valores de “ $R_{máx}$ ” con separaciones no mayores a 0.65 cm
  - **Hiley y Gates** a partir de  $R_{máx} \geq 481,727.21$  kg
- Para los casos de pilotes de concreto armado pretensado hincados con martillo a vapor de acción simple (V1), hubieron diferentes combinaciones de ecuaciones cuyas penetraciones estuvieron cercas las unas de las otras durante intervalos distintos. Estas combinaciones fueron las siguientes:
  - **Hiley y Janbu** a lo largo de todos los valores de “ $R_{máx}$ ” con separaciones no mayores a 0.45 cm
  - **CEC y Gates** desde  $R_{máx} \geq 315,000.00$  kg con diferencias entre valores no mayores a 0.72 cm
  - **Hiley y Gates** desde  $R_{máx} \geq 418,727.21$  kg con diferencias entre valores no mayores a 0.63 cm
- Para los casos de pilotes de concreto armado pretensado hincados con martillo a vapor de acción doble (V2), hubieron diferentes combinaciones de ecuaciones cuyas penetraciones estuvieron cercas las unas de las otras durante intervalos distintos. Estas combinaciones fueron las siguientes:
  - **Hiley y Janbu** hasta  $R_{máx} \leq 762,396.21$  kg y con separaciones no mayores a 0.30 cm
  - **CEC y Gates** a lo largo de todos los valores de “ $R_{máx}$ ” y con separaciones entre sus valores menores a 0.65 cm
  - **Todas** a partir de  $R_{máx} \geq 700,000.00$  kg
- Para los casos de pilotes de concreto armado pretensado hincados con martillo a vapor de acción diferencial (V3), hubieron diferentes combinaciones de ecuaciones cuyas penetraciones estuvieron cercas las unas de las otras durante intervalos distintos. Estas combinaciones fueron las siguientes:
  - **Hiley y Janbu**, así como **CEC y Gates**, hasta  $R_{máx} \leq 500,000.00$  kg
  - **Hiley, CEC y Gates** a partir de  $R_{máx} > 500,000.00$  kg
  - **Todas** a partir de  $R_{máx} \geq 600,000.00$  kg

### 9.15. Irregularidades e incongruencias halladas durante el proceso de evaluación

Como ya se mencionó en repetidas ocasiones a lo largo del capítulo de evaluación, surgieron una gran cantidad de incongruencias respecto a las magnitudes de las

penetraciones obtenidas. Estas discordancias, se hallaron se representaron en forma de *alzas* en los gráficos de las curvas de tendencia, lo cual fue en contra de la asunción principal de que las penetraciones decrecían mientras aumentaba el valor de “ $R_{m\acute{a}x}$ ”. Si bien en términos generales este principio sí se cumplió, algunos casos con características específicas brindaron las condiciones que generaron aquellas *alzas* en los valores de las penetraciones.

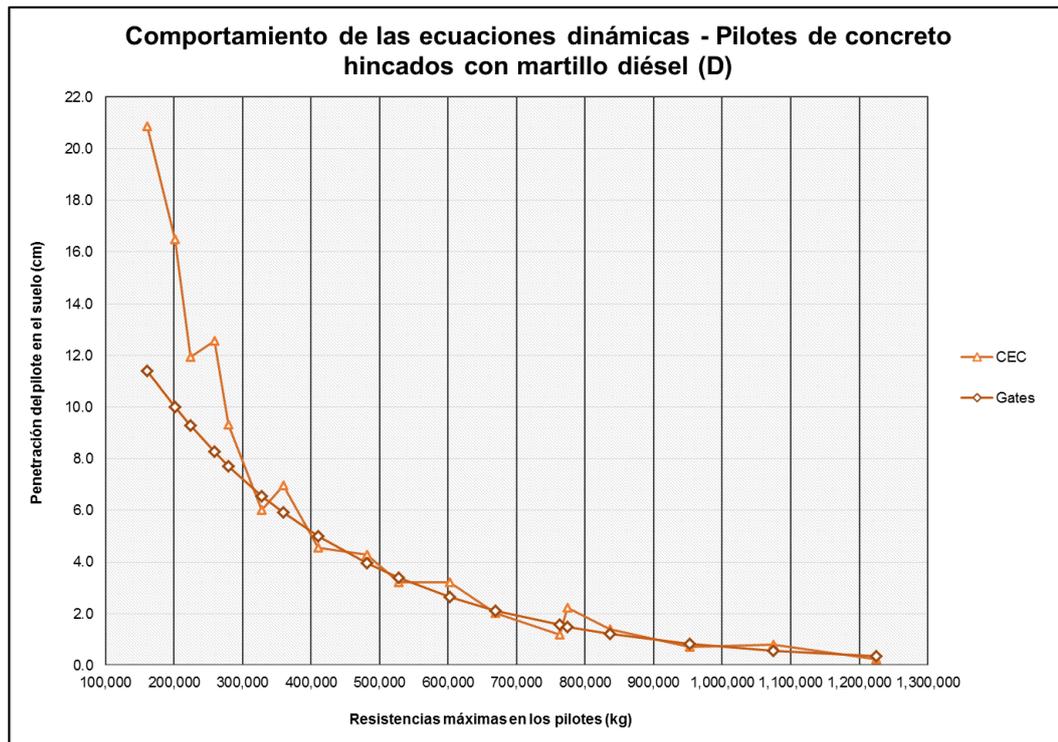


Gráfico 8: Incongruencias en las magnitudes de las penetraciones obtenidas en los pilotes de concreto hincados con martillo diésel (Fuente propia)

En teoría, como se puede observar en el gráfico superior, las magnitudes de las penetraciones de todas las ecuaciones debieron seguir comportamientos similares al de la curva de la ecuación de Gates, la cual obtuvo un descenso liso. Sin embargo, las ecuaciones de Hiley, CEC, Delmag, CUECP y Janbu obtuvieron curvas irregulares (como la de CEC mostrada en la parte superior). Esto se debió a la sinergia de dos razones principales:

- Combinación de energía real suministrada al pilote y la magnitud de “ $R_{m\acute{a}x}$ ”
- Incorporación de la expresión de cálculo de las compresiones elásticas en el sistema de hincado

Gracias a la combinación de estas dos situaciones peculiares, algunos casos evaluados con las ecuaciones anteriormente mencionadas dieron penetraciones que salieron fuera de las tendencias establecidas en un principio.

#### 9.16. Conclusiones y recomendaciones generales

- En aquellos casos donde el valor del coeficiente de variación resultó ser excesivo, se realizó un proceso de filtrado adaptado a las características que presentaba cada grupo de manera que se pueda reducir hasta un valor aceptable en términos relativos al proyecto de investigación. Para modificar el rango de aceptación de cada grupo de datos se utilizaron dos métodos: variar el valor del coeficiente  $K$ , para disminuir la amplitud del rango, y someter al grupo a un ciclo de filtrado adicional bajo un cierto valor de  $K$ . Para efectos de este proyecto de investigación, el coeficiente de variación objetivo fue de 0.40 (normalmente el valor de los coeficientes de variación de los grupos oscilaba entre  $\pm 0.10$  el valor objetivo).
- Los valores de las fórmulas de Eytelwein y ENR mostraron dispersiones grandes respecto a los valores de las demás ecuaciones, por lo que fueron descartadas en todos los casos.
- Es importante resaltar que la elección de un tipo de material en específico depende en gran parte del tipo de entorno en el cual se instalará el elemento, más que por la magnitud de la carga transmitida por la estructura. Dicho esto, es lógico asumir que cuando el suelo en el cual será hincado el pilote es altamente agresivo o corrosivo, se deberá evaluar minuciosamente qué tipo de material se deberá elegir. Por ejemplo, cuando se trata de un suelo con un índice alto de iones de cloruro (como en suelos arenosos cercanos a los mares), es recomendable no utilizar pilotes de acero, pues su vida útil se verá reducida significativamente por la corrosión. En ese caso es mejor utilizar un pilote de concreto armado. No obstante, se debe ser extremadamente cuidadoso durante la fase de diseño y construcción, pues si el concreto resulta ser muy poroso o tiene muchos vacíos por una dosificación o vibrado inadecuado, la armadura interna podría corroerse de igual manera. Por otro lado, si se sabe que el elemento estará en contacto con un entorno completamente saturado, sin posibilidad de secarse, podría ser recomendable utilizar pilotes de madera si las cargas no son muy elevadas. Esto se debe a que cuando la madera se encuentra completamente saturada, no permite el ingreso de oxígeno en su interior, por lo que no será posible que el elemento se pudra.

## 10. Bibliografía

---

### **AFOLAYAN, J. O. y D. A. OPEYEMI**

2010 “Reliability Analysis of Static Pile Capacity for Concrete and Steel in Cohesionless Soils”. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. Nigeria, 2010, volumen 2, pp. 311-319

### **AFOLAYAN, J. O. y D. A. OPEYEMI**

2010 “Stochastic Modeling of Dynamic Pile Capacity Using Hiely, Janbu and Gates Formulae”. *Journal of Sciences and Multidisciplinary Research*. Nigeria, 2010, pp. 311-319

### **ALBUQUERQUE, Paulo**

2014 *Fundações profundas* (Texto en portugués). São Paulo.

### **AMERICAN INSTITUTE FOR STEEL CONSTRUCTION**

2014 *American Institute for Steel Construction 14<sup>th</sup> Edition Structural Shapes Properties Viewer*. Consulta: 25 de octubre de 2015.  
<https://www.aisc.org/default.aspx>

### **AMERICAN SOCIETY FOR CIVIL ENGINEERS**

1993 *Design of Pile Foundations*. Reston.

### **AMERICAN SOCIETY FOR CIVIL ENGINEERS**

1997 *Standard Guidelines for the Design and Installation of Pile Foundations*. Reston.

### **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS**

2006 *Designación A416/A416M: Especificación Normalizada para Torón de Acero de Siete Alambres Sin Recubrimiento para Concreto Preesforzado*. Philadelphia, 2006, pp. 3-4

### AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

2014 *Designación A421/A421M-10: Standard Specification for Uncoated Stress-Relieved Steel Wire for Prestressed Concrete*. Philadelphia, 2014, pp. 1-2

### ANDERSON, Arthur R. y Saad E. MOUSTAFA

1970 “Ultimate Strength of Prestressed Concrete Piles and Columns”. *ACI Journal*. Detroit, 1970, tomo 67-37, pp. 620-630

### BEST ENGINEERING PROJECTS

*Pile Driving Formula – Engineering News Formula*. Consulta: 03 de septiembre de 2014.

<http://bestengineeringprojects.com/civil-projects/pile-driving-formula-engineering-news-formula/>

### BEST ENGINEERING PROJECTS

*Piling Hammer – Types of Piling Hammers*. Consulta: 05 de septiembre de 2014.

<http://bestengineeringprojects.com/civil-projects/piling-hammer/>

### CHELLIS, Robert D.

1971 *Cimentaciones profundas*. Traducción de Arq. David Nadal-Egea. Segunda Edición. México DF: McGraw-Hill.

### CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT OF THE GOVERNMENT OF

2006 **ǰ KONG**

*Foundation Design and Construction*. Hong Kong: The Government of the Hong Kong Special Administrative Region

### CODUTO, Donald P.

2001 *Foundation Design, Principles and Practices*. Segunda Edición. New York: Prentice-Hall.

## CONSTRUCTALIA

*Prestressed Concrete Wire and Strands*. Consulta: 21 de septiembre de 2014.

[http://www.constructalia.com/repository/Products/CivilEngineering/Wire\\_Strands\\_EN.pdf](http://www.constructalia.com/repository/Products/CivilEngineering/Wire_Strands_EN.pdf)

## CORTELLAZZO, Giampaolo y Alberto MAZZUCATO

1998 “Safety Factors with the use of Pile Driving Formulae”. *Rivista Italiana di Geotecnica*. Roma, 1998, pp. 48-62

## DAVIDIAN, Zaven y Pierre LASSAU

1977 *Pilotes y métodos de hincado de pilotes*. Traducción de Editores Técnicos Asociados S.A. Barcelona: Editorial Editores Técnicos Asociados S.A.

## DELMAG

2010 *Dieselbären (Diesel Pile Hammers)*. Consulta: 12 de noviembre de 2014.

<http://www.delmag.com>

## DELMAG

2013 *Pile Driving Equipment*. Consulta: 12 de noviembre de 2014.

<http://www.delmag.com>

## EMCOCABLES

s/f *Steel Wires for Prestressed Concrete: Raw Materials and Manufacturing Procedure*. Consulta: 25 de noviembre de 2014.

<http://www.emcocables.com>

## FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION

1997 “Inspection Sheets for Steam Hammers”. *FHWA Design and Construction of Driven Foundations*. Richmond, 1997, volumen 2, pp. 1-7

## FELLENIOUS, Bengt H.

2006 *Basics of Foundation Design*. Alberta

<http://www.fellenius.net>

**FELLENIOUS, Bengt H.**

2012 “Discussion of Critical Assessment of Pile Modulus Determination Methods”. *Canadian Geotechnical Journal*. Vancouver, 2012, volumen 49, pp. 614-621

**GOBLE, G. G., Frank RAUSCHE y G. E. LIKINS**

1980 “The Analysis of Pile Driving, a State-of-the-Art”. *International Seminar on the Application of Stress-Wave Theory on Piles*. Stockholm, 1980, pp. 131-161

**HAMMER & STEEL**

*Bearing Capacity Chart – Delmag Diesel Pile Hammers*. Consulta: 06 de septiembre de 2014.

<http://www.hammersteel.com/delmag-d19.html>

**HUSSEIN, Mohamad H. y G. E. LIKINS**

1993 “Driving Long Precast Concrete Piles”. *14<sup>th</sup> International Congress of the Precast Concrete Industry*. Washington D.C., 1993, pp. 1-7

**HUSSEIN, Mohamad H., Marty G. BIXLER y G. E. LIKINS**

*Pile Driving Resistance and load bearing capacity*. Consulta: 25 de agosto de 2015.

<http://www.pile.com>

**LI, Shu-T'ien y Chen-Yeh LIU**

1970 “Prestressed Concrete Piling – Contemporary Design Practice and Recommendations”. *ACI Journal*. Detroit, 1970, tomo 67-10, pp. 203-204

**LIKINS, Garland E., Bengt H. FELLENIOUS y Robert D. HOLTZ**

2012 “Pile Driving Formulas Design Practice and Recommendations”. *Pile Driving Contractors Association*. Jacksonville, 2012, volumen 9, artículo 2, pp. 60-67

**LONG, James H., Josh HENDRIX y David JAROMIN**

2009 *Comparison of 5 Methods for Determining Pile Bearing Capacities.*  
Urbana: Wisconsin Highway Research Program

**LOWERY, Lee L. y T. J. HIRSCH**

1968 “A Comparison of Dynamic Pile Driving Formulas with the Wave Equation”. *Texas A&M University*. College Station, 1968, reporte 33-12, pp. 1-15

**MAIN ROADS Western Australia**

2010 *Structures Engineering Design Manual*. Australia, 2010, capítulo 7, pp. 31-45

**METHODS OF CONSTRUCTION**

*Pile Driving Equipment*. Consulta: 08 de septiembre de 2014.

<http://matmetcon.blogspot.pe/2011/11/pile-driving-equipment.html>

**NIGELS, McLeod C.**

2005 “Design of Prestressed concrete piles for seismic loads”. *Pile Driver*.  
Charleston, 2005, pp. 32-36

**PADT-REFORT**

1982 *Manual de diseño para maderas del grupo andino – Junta del acuerdo de Cartagena*. Cartagena, 1982, capítulo 7, pp. 1-10

**PADT-REFORT**

1982 *Manual de diseño para maderas del grupo andino – Junta del acuerdo de Cartagena*. Cartagena, 1982, capítulo 1, pp. 1-33

**PILE DRIVING CONTRACTORS ASSOCIATION**

*Driven-Pile Terms and Definitions*. Consulta: 10 de junio de 2014.

<http://www.piledrivers.org>

**PILING CONTRACTORS**

*Driven Prestressed Concrete Piles*. Consulta: 21 de septiembre de 2014.

<http://matmetcon.blogspot.pe/2011/11/pile-driving-equipment.html>

**PORTUGAL, Hugo**

2014 “Entrevista a Jorge Zegarra”. 06 de mayo de 2014.

**PRASHANT, Amit**

s/f *Foundation Engineering* [diapositivas]. Consulta: 12 de Julio de 2015.

**NIGELS, McLeod C.**

s/f “Hammer Types, Efficiencies and Models in GRL Wave Equation Analysis Program”. *GRL Engineers Inc*. Cleveland, s/f, pp. 97-118

**SALGADO, R.**

2003 *Types of Hammers* [diapositivas]. Consulta: 15 de agosto de 2014.

**SIMONS, Noel y Bruce MENZIES**

2001 *A Short Course in Foundation Engineering*. Segunda edición. Londres: Thomas Telford

**STATE OF CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION**

2005 *Prestress Manual*. California, 2005, pp. 8-14

**SWAN, C. C.**

s/f “Field Estimates for Pile Capacity”. *University of Iowa*. Cleveland, s/f, volumen 53, artículo 139, pp. 3-4

**SWEWE DEUTSCHLAND**

*Fertigteil – Pfähle (Ensamblaje – Pilotes)*. Consulta: 21 de septiembre de 2014.

[http://de.swewe.net/word\\_show.htm/?1522121\\_1&Fertigteil-Pf%C3%A4hle](http://de.swewe.net/word_show.htm/?1522121_1&Fertigteil-Pf%C3%A4hle)

**THE CONSTRUCTOR – CIVIL ENGINEERING HOME**

*Prestressed Concrete Piles*. Consulta: 21 de septiembre de 2014.

<http://theconstructor.org/others/prestressed-concrete-piles/11/>

**THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS**

1954 “Hiley Pile Formula”. *Civil Engineering Code of Practice #4*. Londres, 1954, pp. 1-4

**UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION**

2012 *Bridge Design Aids – Prestressing Steel, Design Properties*. Estados Unidos, 2012, pp. 1

**UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION**

2006 *Design and Construction of Driven Pile Foundations*. Estados Unidos, 2006, volumen 1, pp. 10.1-12.24  
<http://www.vulcanhammer.org>

**WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION**

1988 “Comparison of Methods for Estimating Pile Capacity”. *Washington State Department of Transportation*. Seattle, 1988, pp. 9-62

**WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION**

2005 “Development of the WSDOT Pile Driving Formula and its Calibration for Load and Resistance Factor Design”. *Washington State Department of Transportation*. Seattle, 2005, pp. 2-45

**YOUNG, Hugh D. y Roger, FREEDMAN**

2009 *Física Universitaria*. Traducción de Victoria A. Flores. Dos volúmenes. Volumen uno. Décimo segunda edición. México D.F.: Pearson Education

**ZEGARRA, Jorge**

s/f *Cimentaciones profundas* [diapositivas]. Consulta: 03 de octubre de 2014.

**ZEGARRA, Jorge**

2012 “Resumen de cimentaciones profundas”. Material del curso de Ingeniería de Cimentaciones. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú

**ZHANG, Quian-qing y Zhong-miao ZHANG**

- 2012 “A simplified nonlinear approach for single pile settlement analysis”.  
*Canadian Geotechnical Journal*. Canadá, 2012, Volumen 49, pp. 1256-  
1266

