

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTIMACIÓN DE LAS CAPACIDADES DE FUSTE Y PUNTA DE PILOTES
MEDIANTE ENSAYOS DINÁMICOS DE BAJA ENERGÍA**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR:

Alfonzo Salazar, Franchesca Janette

Álvarez Socorro, Andrés Alejandro

PROFESOR GUÍA:

Ingeniero Echezuría, Heriberto.

FECHA:

Caracas, Junio de 2018.

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTIMACIÓN DE LAS CAPACIDADES DE FUSTE Y PUNTA DE PILOTES
MEDIANTE ENSAYOS DINÁMICOS DE BAJA ENERGÍA**

Este jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo, ha evaluado su contenido con el resultado: VEINTE (20) PUNTOS

JURADO EXAMINADOR

Nombre: <u>HERIBERTO ECHEZURÍA</u>	Nombre: <u>Pedro Carrillo</u>	Nombre: <u>JOSE MOROJA</u>
Firma: <u>[Firma]</u>	Firma: <u>[Firma]</u>	Firma: <u>[Firma]</u>

Nombre del Tutor:

Ing. Heriberto Echezuría



Prestadores:

Alfonzo S, Franchesca J.

Álvarez, S. Andrés A.

Caracas, 22 de Junio de 2018

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente.

A mis padres, Janette Salazar y Alfredo Rodríguez, por apoyarme en todo momento, por los valores inculcados, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor que es infinito.

A mis tíos, Yoiret Salazar y Leonardo Márquez, que han sido también mis padres, por brindarme un hogar y sentido de familia, por ser cómplices y críticos en las decisiones de mi vida, por enseñarme lo importante que es el saber. Soy quien soy gracias a ustedes.

A mis hermanos, José Ignacio, Geraldine y Francisco Alfonzo, por todo su amor, sin ustedes mi vida estaría totalmente incompleta.

A los hermanos que me regalo la vida, Katherine Galicia, Carla Urrea y Luis Daniel Alvarado, por su amistad tan sincera desde que éramos unos niños. El tiempo sigue pasando y ahí están los tres, tan presentes en mi vida como el primer día, haciendo que los kilómetros de distancia que hoy nos separan, se vuelvan insignificantes.

A mi gran amigo y compañero de tesis, Andrés Álvarez, por brindarme su amistad incondicional y por darme la calma y la paz que necesite en los momentos difíciles. También le dedico este logro a mis amigos y compañeros de carrera Ismael Quijada, Gianpaolo Salvatorelli, Daniel González, Egger Romero y Román Rumbaut, por enseñarme que todo obstáculo se puede vencer si estamos juntos.

A todas las personas maravillosas que conocí en esta carrera, en especial a Lorena Carballo, Daniel Camacho, Roxana Gómez, Flavio Vieira, Andreina Pernia y Ali Estrada, por ser mi soporte y compañía. Le doy gracias a Dios por haber puesto en mi camino a personas tan maravillosas como ustedes.

Franchesca Alfonzo Salazar.

DEDICATORIA

Este material va dedicado a primeramente a Dios por haber sido el testigo principal en todas las victorias y fracasos que se presentaron en este largo camino por el título de Ingeniero Civil.

Por otro lado le regalo el logro que viene dado con este trabajo a mis padres, por ser los que me levantaron en cada caída y por creer en mí más que yo mismo.

A mis hermanos por estar presente en cada paso que doy, su compañía representa el complemento indispensable que le da vida a una familia perfecta.

A Mónica Andreina Antonio García, por llegar en el momento perfecto para quedarse y mostrarme el camino correcto. Por su manera desinteresada de brindarme apoyo siendo uno de mis pilares fundamentales.

A mi casa de estudio, Universidad Católica Andrés Bello, por darme el lujo de compartir mis días con las personas que me enseñaron que estando solo nada es posible, entre ellos a Franchesca Alfonzo, por ser mi compañera de batallas desde el primer día y por darme un pedacito de la bondad que tiene para brindar a diario, a Gianpaolo Salvatorelli, Ismael Quijada y Daniel González por estar siempre en el camino correcto sin perder la necesaria costumbre de sacar tiempo para los amigos, por tal razón le dedico este trabajo a las gotas de sudor, los momentos de risas, los momentos de tristezas y la enseñanza de que entre amigos el logro de uno es el logro de todos.

Andrés Alejandro Álvarez Socorro.

AGRADECIMIENTOS

A nuestro tutor, el Ing. Heriberto Echezuria, por ser nuestro maestro, por guiarnos en el desarrollo de este trabajo especial de grado, por creer en nosotros, por exigirnos y lograr que diéramos lo mejor de nosotros mismos. Gracias por ser un gran maestro, pero sobre todo gracias por ser un gran amigo.

A nuestros compañeros tesisistas Gianpaolo Salvatorelli e Ismael Quijada por la ayuda en el desarrollo del objetivo en común.

Por ultimo agradecemos a nuestros profesores de fundaciones, los Ingenieros José Mora y Pedro Carrillo, por los conocimientos impartidos en clases, por abrirnos las puertas de su oficina y atender siempre las dudas que se nos generaban durante el desarrollo de este trabajo.

Atentamente,
Alfonzo y Álvarez.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo I	12
1.1 Introducción	12
1.2 Planteamiento del Problema.....	13
1.3 Objetivos de la investigación.	14
1.3.1 Objetivo General.	14
1.3.2 Objetivos Específicos.....	14
1.4 Justificación o Importancia del Estudio.	15
1.5 Alcances.	15
1.6 Limitaciones.....	15
Capítulo II. MARCO TEÓRICO	17
2.1 Antecedentes de la investigación	17
2.2 Glosario de términos	19
2.2.1 Arenas	19
2.2.2 Arcillas	20
2.2.3 Suelo como fundación.....	20
2.2.4 Pilotes.....	20
2.2.5 Ventajas de los pilotes excavados.	26
2.2.6 Desventajas de los pilotes excavados.....	26
2.2.7 Vaciado del concreto en pilotes excavados.....	26
2.2.8 Soporte con lodo.	28
2.2.9 Condiciones mínimas para que un pilote sea vaciado “in situ”.	28
2.2.10 Carga sobre pilotes.....	29
2.2.11 Capacidad Portante	30
2.2.12 Pilotes en Arena.	31
2.2.13 Fundaciones en arcilla.....	32
2.2.14 Ensayos de Carga en pilotes.....	32
2.2.15 Onda de compresión.....	35
2.2.16 Amortiguamiento	35
2.2.17 Frecuencia	35
2.2.18 Amplitud	36

2.2.19 Impedancia	36
2.2.20 Lazo de histéresis	36
2.2.21 Energía potencial.....	36
2.2.22 Energía cinética.....	37
2.3 Bases Teóricas.....	37
2.3.1 Leyes de Newton.....	37
2.3.2 Distribución de cargas en pilotes (punta y fricción) en ensayos estáticos.	37
2.3.3 Curvas de Reese y O'Neill y Norma API RP 2 A.	38
2.3.4 Aspectos teóricos y distribución de fuerzas en el ensayo dinámico.	43
2.3.5 Análisis de fuerzas dentro del pilote.	48
2.3.6 Reacción Estática del suelo (Rss)	49
2.3.7 Reacción dinámica del suelo (RSD)	50
2.3.8 Comparación entre el ensayo estático con el ensayo dinámico de baja energía.	50
2.3.9 Consideraciones del ensayo dinámico de baja energía. Diferencia entre el ensayo dinámico de baja energía y el de alta energía.	58
2.3.10 Reacciones y fuerzas a considerar en el ensayo dinámico de baja energía.	60
2.3.11 Procedimiento y consideraciones antes de la realización del ensayo dinámico de baja energía.....	61
Capítulo III. MARCO METODOLOGICO	71
3.1 Tipo de investigación.	71
3.2 Diseño de la investigación	71
3.3 Descripción de la metodología.....	71
Capítulo IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
4.1 Estimación de las capacidades de fuste y punta, mediante resultados obtenidos de pruebas dinámicas de baja energía.	74
4.2 Estimación de las capacidades de fuste y punta de pilotes, cuando no se cuenta con celdas medidoras de fuerza. Método alternativo para la ejecución del ensayo.	75
4.3 Casos que se pueden presentar una vez realizado el ensayo.....	77
4.4 Identificación de las variables que afectan el desarrollo de la capacidad de un pilote.....	78

4.5 Realización de un árbol estadístico para establecer el nivel de influencia que tienen cada una de estas variables.....	79
4.6 Estimación de la probabilidad de desarrollo de la capacidad de carga de un pilote, mediante un ensayo dinámico de baja energía.....	83
4.7 Ejemplo práctico de la realización de un ensayo dinámico de baja energía, donde no se cuenta con celdas medidoras de fuerzas, partiendo de los datos de una perforación realizada por “Geolab Consultores” en un estrato que se puede considerar homogéneo de arena.	85
Capítulo V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
5.1 Conclusiones.	96
5.2 Recomendaciones.....	97
BIBLIOGRAFÍA.....	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de resultados de una prueba dinámica en pilotes de 90 y 70 cm de diámetro.	57
Tabla 2. Asentamientos recomendados de acuerdo al diámetro del pilote. Relación de estos mismos parámetros en %.	63
Tabla 3. Influencia de la relación de impedancia en la amplitud de las ondas de desplazamiento y de esfuerzos, tanto reflejadas como transmitidas.	69
Tabla 4. Resumen de resultados de una prueba dinámica en pilotes de 90 y 70 cm..	75
Tabla 5. Probabilidad de tener un pilote bueno o malo para alcanzar la capacidad de carga ya ajustada.	80
Tabla 6. Resultado de aplicación del árbol de decisión para cada una de las rutas. ..	80
Tabla 7. Probabilidad de que un pilote desarrolle o no desarrolle su capacidad de carga, arrojada del árbol de decisión.	81
Tabla 8. Probabilidad de que un pilote desarrolle o no la capacidad portante según fallas.	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de los diversos tipos de pilotes.....	21
Figura 2. Cargas y longitudes máximas habituales de diversos tipos de pilotes (valores de proyecto). También son usuales cargas y longitudes mayores.....	22
Figura 3. Pilote tipo straus	23
Figura 4. Pilote tipo benoto.....	24
Figura 5. Pilotes excavados con maquina rotativa.....	25
Figura 6. Pilas coladas.	26
Figura 7. Curvas típicas de carga-asentamiento en pilotes excavados en arena y arcilla.....	30
Figura 8. Esquema de pruebas estáticas.....	33
Figura 9. Prueba dinámica en pilote terminado, mediante golpe de una masa denominada martillo.....	35
Figura 10. Representación gráfica de amplitud y frecuencia.....	36
Figura 11. Aparición progresiva de los esfuerzos de punta y fricción en relación al desplazamiento, utilizando el ensayo estático.....	38
Figura 12. Curvas de reese o'neill.	39
Figura 13. Curvas normalizadas de resistencia lateral con asentamiento para arenas y arcillas, denominadas, t-z.....	40
Figura 14. Curvas normalizadas de resistencia de punta con asentamiento para arenas y arcillas, denominadas, q-z.....	41
Figura 15. Curvas de resistencia de fricción y punta con asentamiento para arenas. Según la norma api rp 2 a.....	42
Figura 16. Curvas de resistencia de fricción y punta con asentamiento para arcillas según la norma api rp 2 a.	43
Figura 17. Esquema del proceso de generación de ondas de compresión en el pilote y en el martillo durante el ensayo de carga dinámica.	45
Figura 18. Desfase entre la fuerza de compresión y la fuerza de inercia, generadas por la onda compresiva.	46
Figura 19. Análisis de fuerzas producidas en el pilote, mediante un diagrama de cuerpo libre.....	49
Figura 20. Esquema del proceso de transmisión de la energía del pilote al suelo en cada impacto.....	51
Figura 21. Comparación de capacidades medidas en pilotes idénticos ensayados con pruebas de carga estática y con pruebas dinámicas	53
Figura 22. Representación gráfica de mediciones de fuerza para ensayos dinámicos y estáticos.....	54
Figura 23. Esquemático de resultado de prueba de carga estática con mediciones de a) carga-asentamiento y b) cargas de fricción y punta a distintas profundidades	

de un pilote de 90 cm de diámetro en arena para distintos desplazamientos del mismo.....	55
Figura 24. Curva backbone.	59
Figura 25. Lazos de histéresis para ensayos dinámicos de alta y baja energía.	60
Figura 26. Explicación grafica para la obtención de los factores a y b en las curvas de reese y o’neill, para suelos arenosos	64
Figura 27. Representación gráfica de la relación de la energía de entrada en el pilote y la energía potencial que posee martillo a diferentes alturas.....	67
Figura 28. Representación de los rangos establecidos en las curvas de capacidad-asentamiento de reese y o’neill para un pilote en particular	84
Figura 29. Curvas capacidad-asentamiento para un pilote de 1 m de diámetro.....	91

RESUMEN

El enfoque de este trabajo especial de grado es estimar las capacidades de punta y fricción mediante ensayos dinámicos de baja energía. La clave de esta metodología es que se ha podido comprobar que cuando los ensayos dinámicos son de baja energía, las curvas de carga asentamiento que se obtienen de estos ensayos coinciden con las obtenidas mediante ensayos estáticos, para desplazamientos bajos, y esto se debe a que la componente dinámica es despreciable frente a la estática para niveles bajos de energía, Echezuria, Heriberto, “Apuntes de Pruebas Dinámicas y Estáticas en pilotes”. Esto es debidamente discutido en este Trabajo especial de grado (TEG) y además se presentan evidencias de mediciones que corroboran este hallazgo. En general, para realizar el método dinámico se deben medir parámetros como la aceleración que adquiere el pilote y la deformación que produce el impacto del martillo en el mismo, además del desplazamiento o asentamiento definitivo. Luego con correlaciones dinámicas se estima la capacidad total del pilote. La ventaja del método planteado en este TEG es que permite estimar las capacidades de fuste y punta separadamente, utilizando las curvas de Reese y O’Neill debido a que, como se mencionó antes, estas coinciden con las dinámicas para desplazamientos bajos. Estas estimaciones se comparan con la capacidad total del pilote para definir si ambas capacidades están desarrollándose adecuadamente.

Adicionalmente, se describe un método alternativo, en el cual se estiman las fuerzas para una prueba de muy baja energía. En esta alternativa se estiman las fuerzas que se generan en el pilote una vez que el ensayo es realizado, mediante un equilibrio de fuerzas. Al ser una prueba de muy baja energía los asentamientos que se producen también serán bajos.

También se propone una forma de estimar la altura del golpe necesaria para que el ensayo dinámico se considere de baja energía. La estimación de dicha altura se hace mediante un análisis de cantidad de movimiento, donde se consideran las posibles pérdidas que pueden generarse al momento del ensayo.

Adicionalmente, se estima la probabilidad que tiene un pilote en desarrollar su capacidad considerando en un árbol de decisión, las variables claves que inciden

en el desarrollo de las capacidades de fuste y punta. La probabilidad de que el pilote quede bien, se calibra finalmente utilizando datos disponibles en la literatura de investigadores alemanes. Luego, esta probabilidad se combina con las curvas de Reese y O'Neill, obtenidas de Braja Das (2001) "Fundamentos de la ingeniería Geotécnica", 7ma edición, para establecer los rangos para los cuales se estima que los pilotes tendrán dificultad en alcanzar la capacidad admisible con el asentamiento desarrollado durante el ensayo.

Capítulo I

1.1 Introducción

El comprender y calcular la capacidad de carga en fundaciones profundas es de vital importancia, ya que los pilotes son de común uso cuando la magnitud de las cargas es elevada, o los suelos superficiales no tienen suficiente capacidad de soporte. Existen expresiones matemáticas cuyos parámetros geotécnicos tales como: ángulo de fricción interna (ϕ), cohesión (c), peso unitario total (γ_t), humedad natural (w) y la resistencia a la penetración estándar (N_{spt}), deben conocerse para estimar la capacidad de carga. Sin embargo, una vez que el pilote es construido siempre existe la incertidumbre si este logra desarrollar su capacidad de carga para los asentamientos admisibles. Para estimar eso se realizan pruebas de carga estáticas o dinámicas. Es bueno destacar que las pruebas dinámicas son no destructivas y permiten utilizar pilotes de la obra mientras que las estáticas deben ser realizadas en otros pilotes fuera de la obra ya que son usualmente destructivas.

No obstante, la contratación de empresas especializadas para la realización de los ensayos dinámicos implica costos, aunque los mismos resultan menores que las pruebas estáticas y, como ya se mencionó, tienen la ventaja de que son no destructivas. Es bueno destacar que cuando el ensayo dinámico es realizado con baja energía que sea capaz de movilizar el pilote, las cargas estáticas y dinámicas coinciden. Esto será discutido en detalle en el desarrollo de este TEG.

La formulación conceptual básica para el método fue planteada por Echezuria, Heriberto, “Apuntes de Pruebas Dinámicas y Estáticas en pilotes” quien la ha aplicado en algunos trabajos exitosamente. Es por ello que este TEG se profundiza los detalles analíticos de dicha formulación conceptual para darle solidez y se presenta el procedimiento para la realización de ese tipo de ensayos dinámicos de baja energía con la finalidad de estimar las capacidades de punta y fricción admisibles de pilotes.

Al igual que las pruebas de carga dinámicas el procedimiento incluido en este TEG consiste, principalmente, en generar ondas de compresión dentro del pilote, las cuales a su vez producen fuerzas internas en el elemento, que serán estudiadas

posteriormente. Estas ondas generadas se generan mediante el impacto de una masa con la finalidad de suministrarle suficiente energía al pilote para que este logre asentarse y a partir de ese asentamiento inducido estimar la capacidad de carga que tendrán dichos pilotes.

1.2 Planteamiento del Problema

Existe una serie de incertidumbres en la ingeniería de fundaciones en cuanto a si un pilote alcanza o no la capacidad esperada, una vez que este es construido. Es por ello que se realizan pruebas de carga para identificar si los pilotes una vez que son construidos serán capaces de desarrollar su capacidad para los asentamientos admisibles. Por lo general estos ensayos son realizados e interpretados por empresas especializadas y dichas empresa solo proporcionan como resultado la capacidad total del pilote, mas no dan información de cuanto de esa capacidad total tomara la punta y cuanto tomara el fuste. Para ello se propone un tipo de prueba o ensayo de carga conceptualizada por Echezuria, Heriberto, “Apuntes de Pruebas Dinámicas y Estáticas en pilotes”, que permite estimar la capacidad del elemento estructural, con la finalidad de reconocer si el mismo, logrará alcanzar de manera satisfactoria la capacidad para la cual fue diseñado. Dicha prueba se basa en un ensayo dinámico de baja energía que es capaz de asentar el pilote dentro del rango estático y a partir de este asentamiento inducido estimar la capacidad de carga que tendrán estos elementos utilizando las curvas propuestas por Reese y O’Neill para establecer el desarrollo de ambas capacidades bajo cargas estáticas.

Las curvas propuestas por Reese y O’Neill, obtenidas de Braja Das (2001) “Fundamentos de la ingeniería Geotécnica”, 7ma edición, sugieren que una vez que el pilote ha sido construido o colocado a la profundidad requerida por el diseño debe alcanzar las capacidades últimas tanto de fuste como de punta a medida que es cargado y en consecuencia se asienta. El rango establecido por dichas curvas indica que algunos pilotes alcanzarán dichas capacidades sin problemas pero otros, los que están en la parte inferior del rango mostrado, requerirán más asentamiento para desarrollarlas. Esta constituye una de las bases del método de Echezuria pues se toma como premisa que los pilotes bien construidos alcanzarán sin ninguna o con muy

poca dificultad la capacidad deseada en el diseño, sólo que los asentamiento requeridos para ese fin variarán.

A su vez los resultados arrojados de este ensayo tienen implícita una serie de ecuaciones relacionadas con la teoría de ondas, cuyo análisis e interpretación resulta ser menos compleja en comparación con otras teorías aplicadas en otros casos, como cuando es necesario el avance de pilotes hincados, de las cuales es posible estimar la capacidad total del pilote mas no necesariamente las individuales de fuste y punta. Dichas ecuaciones serán discutidas y verificadas con información existente en la literatura, para lograr conformar las pruebas a realizar con la suficiente confianza. La interpretación de los resultados de los ensayos dinámicos propiamente dichos para hinca, generalmente suelen ser manejados por empresas especializadas que los han masificado con las limitaciones ya mencionadas.

Tomando en cuenta lo anteriormente expuesto, la propuesta de este TEG incluye la verificación de los métodos propuestos por Echezuría los cuales están basados en evidencias del comportamiento de pilotes estáticos y pruebas dinámicas de baja energía. Así se logrará el debido soporte que permitirá incorporar estas bondades durante las etapas de diseño y verificación de pilotes en sitio. Además se presenta una forma detallada y sencilla de realizar las estimaciones de capacidades de punta y fricción mediante ensayos dinámicos de baja energía, basándonos en una serie de simplificaciones relacionadas con la energía que se le suministra al pilote.

1.3 Objetivos de la investigación.

1.3.1 Objetivo General.

Estimar las capacidades de punta y fricción de pilotes mediante pruebas dinámicas de baja energía con base en información existente en la literatura.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Comparar el proceso de desplazamiento del pilote mediante el ensayo dinámico de baja energía con el ensayo estático.
- Establecer la diferencia de lo que es un ensayo dinámico de baja energía con el ensayo dinámico de alta energía.

- Estimar la altura del martillo para realizar el impacto durante el ensayo dinámico que permita la comparación de la prueba estática con la prueba dinámica de baja energía.
- Estimar la probabilidad de que un pilote desarrolle su capacidad para los asentamientos admisibles.

1.4 Justificación o Importancia del Estudio.

El presente Trabajo Especial de Grado se basa en el desarrollo de un método sencillo y lógico para lograr estimar las capacidades de punta y fricción en pilotes que se encuentren dentro del proceso constructivo de una obra, mediante ensayos dinámicos de baja energía. Cabe destacar que los pilotes no desarrollan su máxima capacidad de manera inmediata, sino a medida que se asientan con la aplicación de cargas sobre el mismo, lo cual sucede después de un periodo de reposo que permita el denominado “set up” o “reacomodo del suelo” alrededor del pilote.

La importancia de poder predecir y reconocer si el elemento estructural utilizado como fundación profunda, logra alcanzar su capacidad finalizada la construcción del mismo, previene problemas vinculados con el funcionamiento de la estructura asociada con los asentamientos admisibles de los pilotes. Si se predice y se tiene la certeza que el pilote no desarrolla su capacidad, se pueden generar soluciones antes de que se agrave la situación.

1.5 Alcances.

El presente trabajo propone un método pseudo-estático de baja energía para lograr la penetración del pilote que servirá como herramienta para analizar si se cumplirá con los requerimientos de capacidad tanto de fuste como de punta del miembro para los asentamientos admisibles.

Para esta investigación se utilizará información disponible en la literatura la cual se organizará y analizará para conformar el método sugerido.

1.6 Limitaciones.

En este trabajo solo se consideraran los suelos arcillosos y arenosos, por lo tanto los casos que contemplen perfiles geotécnicos heterogéneos o suelos limosos,

expansivos, colapsables y licuables no se tomaran en cuenta en esta investigación. Similarmente, el método aquí presentado solamente aplica a pilotes con diámetros entre 0,4 m y 1,5 m. Para diámetros mayores hay que verificar en detalle la aplicabilidad del mismo.

Capítulo II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

El análisis de fuentes bibliográficas pertinentes a la temática en estudio efectuado, permitió seleccionar como precedentes más significativos a este trabajo, las investigaciones que a continuación se presentan:

- Apuntes del ingeniero investigador Heriberto Echezuria, “Pruebas estáticas y dinámicas en pilotes” Universidad Católica Andrés Bello.

Este primer trabajo, está enfocado en el recaudado de información sobre la aplicación del ensayo estático y el ensayo dinámico para la estimación de la capacidad al que el mismo trabaja para varios niveles de asentamiento. Aquí se aprecian los aspectos teóricos de cada ensayo y la interpretación de los resultados de ambos para posteriormente realizar la comparación entre ellos.

- Nicolas Charue, “Pile Dinamic Testing”, (2004).

Esta investigación hace referencia a la comparación de un ensayo dinámico con un ensayo estático. El mismo demostró que para ensayos dinámicos en los que el pilote tiene asentamientos pequeños este puede ser comparado con mucha exactitud con el ensayo estático debido a que las curvas de carga-deformación para bajos desplazamiento coinciden perfectamente.

El autor también estudio los diversos factores que están involucrados en la pérdida de energía del impacto al momento de realizar el ensayo dinámico y estableció que las perdidas están enfocadas principalmente al tipo de suelo y al tipo de martillo que se utiliza para desarrollar la prueba. El investigador estimo la eficiencia del golpe con un martillo tipo Vulcan, es decir, el valor de eficiencia que el estimo en su investigación es para esta clase de martillo.

- Mark R. Svinkin, “Engineering Judgement in Determination of Pile Capacity by Dinamic Methods” (2000).

Este trabajo tuvo un enfoque en los métodos dinámicos conducidos que poseen una ventaja a la hora del ensayo de pilotes, donde explica que a pesar de una excelente evaluación de ingeniería de los resultados obtenidos de pruebas estáticas y

pruebas dinámicas. Se indica en el mismo que es obvio que la aplicación de métodos dinámicos a las pilas carece de juicio de ingeniería. Se cubren otros varios problemas como evaluación engañosa de la precisión de fórmulas dinámicas, calibración de programas de ecuaciones de ondas, el efecto de consolidación en la predicción en la capacidad de pila por análisis de ecuaciones de ondas, comparación de pruebas estáticas y dinámicas, predicción de la capacidad de pila por pruebas de pila dinámica, capacidades sobrestimadas de la técnica de emparejamiento de señales y otros. Se muestra que los métodos dinámicos deben usarse con el juicio de ingeniería adecuado para la predicción de la determinación de la capacidad del pilote.

- Frank Rausche y Evgenia Anna Sellountou, “Quality Management by Means of Load Testing and Integrity Testing Of Deep Foundations”.

Esta publicación presentada por los investigadores mencionados incluye varios métodos para una evaluación económica de la calidad geotécnica y estructural de pilotes hincados y excavados. Los métodos de carga para la determinación de la capacidad de pilotes, contemplados en esta investigación son el ensayo de carga estática convencional, ensayo de carga dinámico, ensayo de carga bidireccional y ensayos de carga rápida, donde se hace énfasis en el ensayo de carga dinámica. Este método está basado en la medición de fuerza y aceleración bajo el impacto de una gran masa.

También contempla que cada método de medición está sujeto a un riguroso análisis para calcular la capacidad estática de pilotes. El método cuenta tanto para componentes estáticos como dinámicos de respuesta del suelo y así determinar la distribución de esfuerzos, factores de amortiguamiento y rigidez del suelo. Los ensayos de carga dinámica y su aplicación tanto en pilotes hincados y excavados se discuten en esta investigación. El ensayo de carga en pilotes asegura que las condiciones geotécnicas son suficientes para un desempeño satisfactorio del pilote.

- Klingmuller, Oswald and Kirsch, Fabian, “A quality and safety issue for cast in place piles with low strain integrity testing in Germany”, (1998).

Esta investigación se basa principalmente en el recaudo de información relevante de pruebas realizadas en pilotes durante 25 años que se encontraban en la

región, por un grupo de alemanes especializados en pruebas dinámicas. Ellos consiguieron que aproximadamente del 1 al 2% de todos los pilotes construidos por cada año han sido ensayados, encontrándose los mismos bajo inspección.

Durante esos 25 años, el rango de pilotes ensayados por cada año estuvo entre 5.000 a 10.000 pilotes, dándonos un aproximado de 250.000 pilotes ensayados durante todos esos años. Se encontró que el 15% de todos los pilotes ensayados disponían de algún tipo de imperfección; esto arroja que al menos 37.500 pilotes presentaban algún tipo de problema.

Los investigadores determinaron que del 15% de esos pilotes, solo el 5% presentaban una imperfección significativa, lo que nos da un valor de 12.500 pilotes. El 10% restante contaba con imperfecciones despreciables que no tenían relevancia alguna.

A su vez determinaron que aproximadamente solo el 1% del total de pilotes ensayados durante esos 25 años, presentaron defectos graves y necesitan algún tipo de remediación, es decir 2.500 pilotes necesitan ser reparados para puedan funcionar de la manera esperada. Realizando una serie de investigaciones encontraron que solo dos tercios de este porcentaje no logro desarrollar su capacidad y el tercio restante presentaba fallas por integridad estructural.

2.2 Glosario de términos

2.2.1 Arenas

Son materiales cuyo origen es similar al de las gravas. La principal diferencia entre las gravas y las arenas es el tamaño de la partícula, entendiéndose que las arenas son partículas pequeñas de piedra de carácter silicio con un diámetro entre 0,02 y 2 mm; por su parte las gravas son mayores de 4.75 mm. Este agregado al igual que las gravas tiene un uso indispensable en la construcción, por lo que se puede encontrar minas de este material en todo el mundo.

Los suelos arenosos contienen poca materia orgánica y son generalmente permeables. Sin embargo se debe considerar que los suelos arenosos que contengan más de un 20% de contenido de finos son prácticamente impermeables.

2.2.2 Arcillas

Son materiales químicamente muy activos y mecánicamente muy plásticos al ser mezclados con agua, cuando esta húmedo o mojado, resulta pegajoso pero, cuando está seco suele contraerse y endurecerse fuertemente presentando un agrietamiento prismático, es un material muy fino y suave dado que la arcilla está formada por partículas diminutas de menos de 0,002 mm de diámetro. Al formar su estructura dentro de un ambiente acuático, pueden llegar a presentar muy altas humedades (hasta 5 a 6 veces más agua que sólidos, en peso), siendo entonces muy blandos y altamente compresibles, contando con muy baja resistencia al esfuerzo cortante y en algún momento se torna plástico, esto es fácilmente moldeable. Esta estructura posee relación es de vacíos relativamente grandes y a pesar de ello son materiales muy poco permeables.

Una de las características principales de estos suelos es que cuando se someten a la acción de esfuerzos compresivos, la deformación correspondiente no se presenta de manera instantánea, como en otros materiales, sino que evolucionará con el tiempo. Otra característica interesante es que cuando se remoldean, pierden gran parte de su resistencia, la cual la pueden recuperar parcialmente con el tiempo; este fenómeno se conoce como “tixotropía”.

2.2.3 Suelo como fundación

Es la masa de suelo que recibe las cargas de la estructura, en otras palabras, es la parte del suelo que se encarga de recibir y terminar de disipar las cargas que son transmitidas por la fundación.

2.2.4 Pilotes

Los pilotes son elementos estructurales que transmiten de forma adecuada las cargas que provienen de la estructura al suelo de fundación más competente. Se consideran fundaciones profundas, debido a que la relación ancho/ profundidad (B/D), es mayor a cinco (5).

Existe una amplia gama de pilotes, que se caracterizan de acuerdo a: el método constructivo (hincados o excavados), el material del elemento (concreto, acero o madera), efecto que produce la construcción del mismo (con desplazamientos

o sin desplazamientos) y el mecanismo de transferencia de carga al suelo (de fricción, de punta o ambos).

A continuación en la figura 1 se presenta de forma esquematizada los diferentes tipos de pilotes.

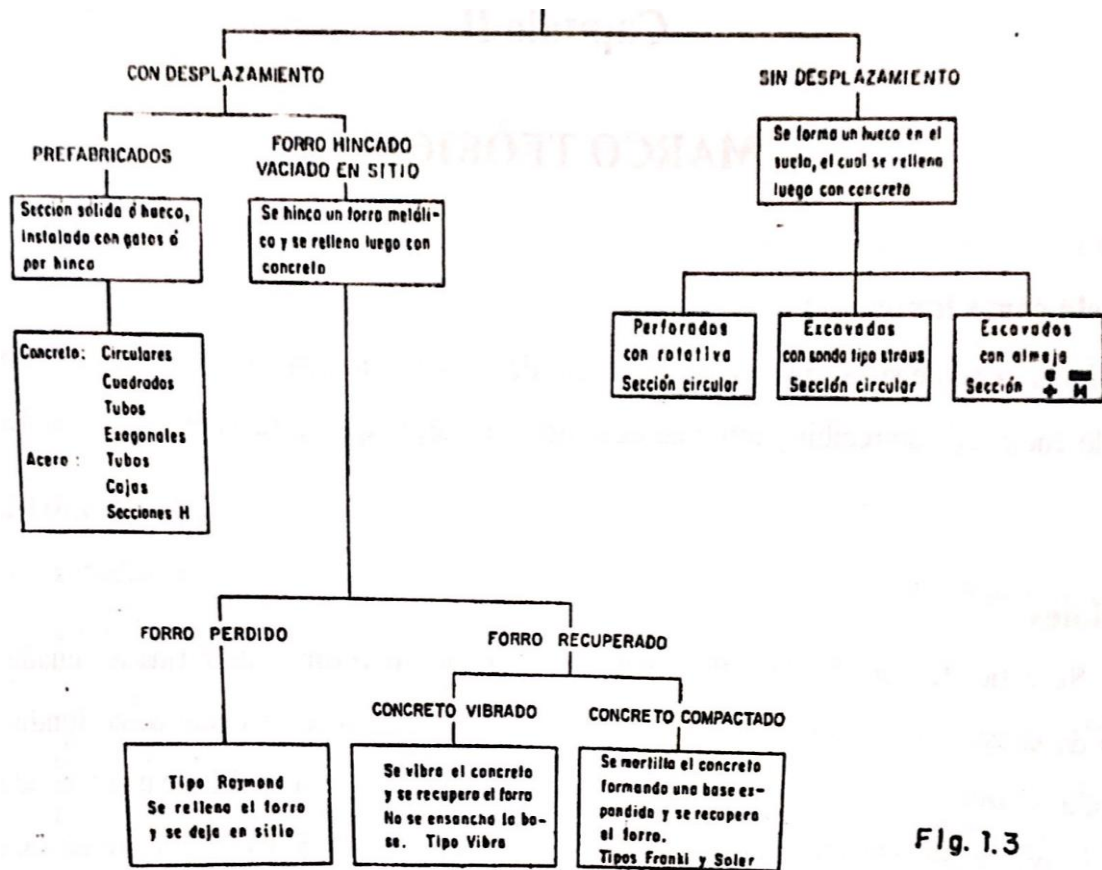


Fig. 1.3

Figura 1. Esquema de los diversos tipos de pilotes

Fuente: Ingeniería de Fundaciones. Pérez y Carrillo (1981).

En cuanto al mecanismo de transferencia de carga al suelo “Un pilote que recibe la mayoría del soporte por fricción o adherencia del suelo a lo largo del fuste se denomina pilote de fricción o flotante. El pilote que recibe la mayor parte del soporte del terreno situado bajo su punta es un pilote de punta o pilote columna”, en la siguiente figura se observan los valores típicos de longitudes y las cargas de proyecto para diversos tipos de pilotes (Lambe, 2009).

En la figura 2 se muestran distintos tipos de pilotes, donde se exponen los valores de cargas de proyectos máximas y longitudes usuales máximas. De acuerdo a Cambefort (1962), Perforaciones y Sondeos, “los diámetros de estos pilotes pueden variar de 40 cm a 1,50 m e incluso hasta 3 m”, pág. 404.

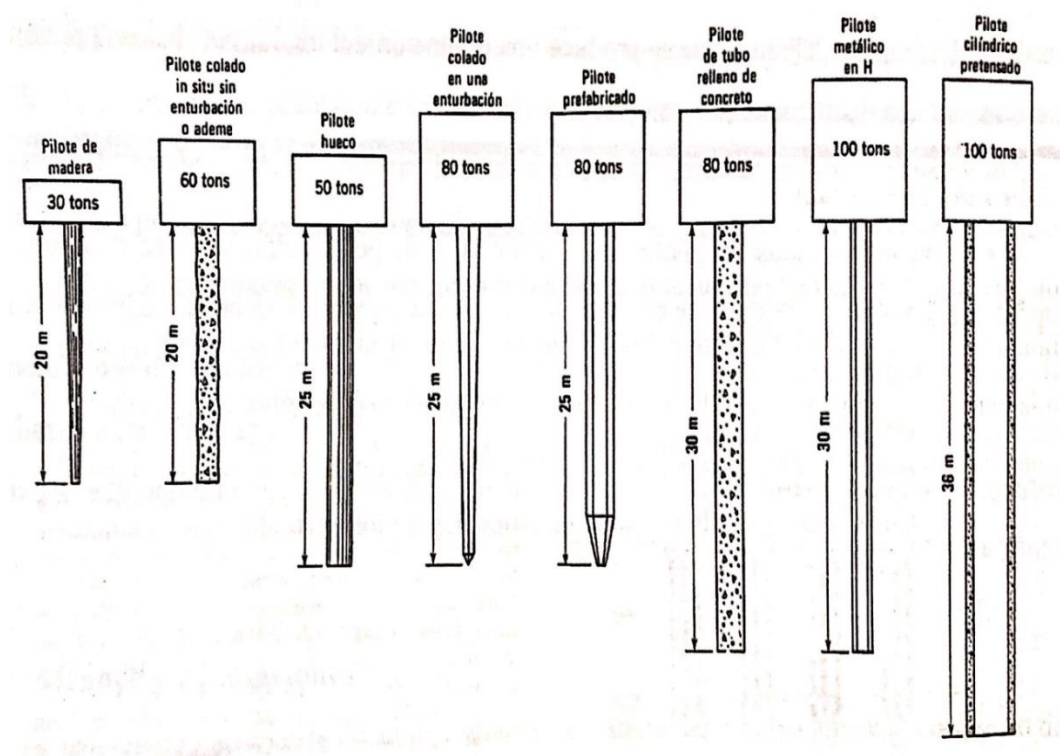


Figura 2. Cargas y longitudes máximas habituales de diversos tipos de pilotes (valores de proyecto). También son usuales cargas y longitudes mayores.

Fuente: Ingeniería de Fundaciones. Pérez y Carrillo (1981).

2.2.4.1 Pilotes hincados.

Los pilotes hincados se denominan pilotes de desplazamiento, debido a que por su instalación no se extrae el terreno, sino que en el proceso de hincar el pilote lo desplaza lateralmente. Estos se fabrican en plantas, bajo las especificaciones contempladas en el diseño.

2.2.4.2 Pilotes excavados.

La principal característica de estos pilotes es que son elementos estructurales que no producen desplazamientos, al no forzar su penetración en el suelo, ya que son excavados y vaciados en sitio.

El método constructivo de los pilotes excavados consiste simplemente en hacer una perforación en el suelo con diversas técnicas, colocar un armado en su interior y posteriormente vaciar el concreto. Dependiendo del tipo de suelo que se perfore, en la excavación pueden generarse derrumbes, debido a que se produce una dilatación del medio por descompresión, lo que ocasiona una disminución de los esfuerzos efectivos.

2.2.4.3 Tipos de pilotes excavados.

- **Pilotes Straus.**

Es uno de los tipos de pilotes más primitivos, su perforación se hace mediante un dispositivo denominado sonda, que consiste en un cilindro metálico con bordes cortantes y una válvula de fondo. Para sostener las paredes de la excavación, se utiliza una camisa o tubo de acero de gran espesor, enroscado o soldado a medida que avanza la excavación y alcanzada la profundidad requerida se vierte el concreto dentro de la camisa, a la vez que se extrae el mismo.

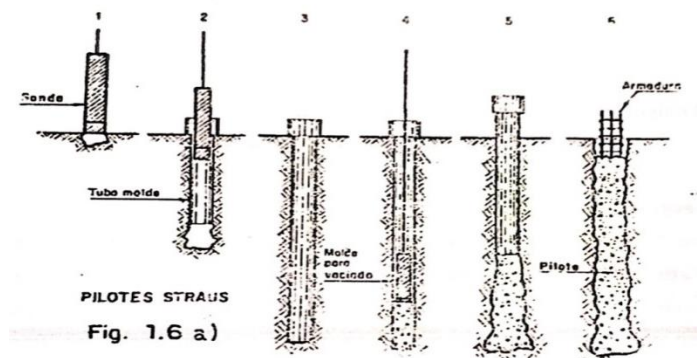


Figura 3. Pilote tipo Straus

Fuente: Ingeniería de Fundaciones, Pérez y Carrillo, 1981.

- **Pilotes tipo Benoto.**

En este tipo de pilote se realiza la perforación con una herramienta denominada “hammer-grab” la cual está conformada por un cilindro pesado que tiene en su extremo inferior una almeja abierta con dientes, la cual se entierra en el terreno por el peso del cilindro al dejarla caer con la almeja abierta, seguidamente se cierra mecánicamente y se iza el “hammer-grab” hacia la superficie donde se vacía la almeja; la excavación se sostiene con una camisa que se extrae a medida que se vierte el concreto en la excavación.

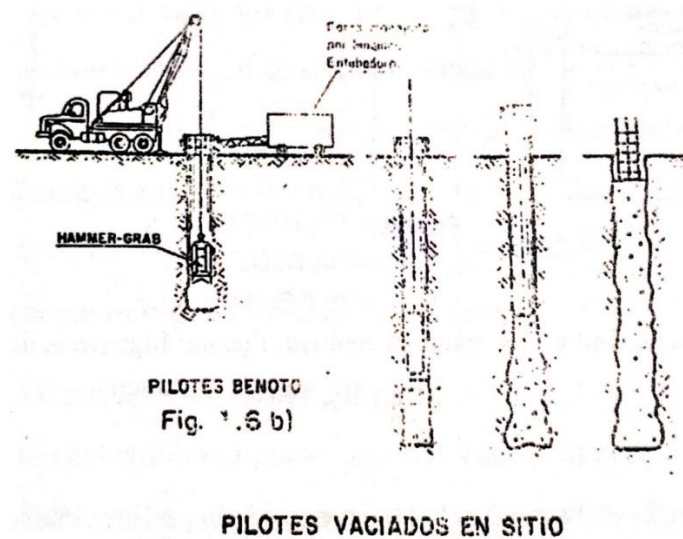


Figura 4. Pilote tipo Benoto.

Fuente: Ingeniería de Fundaciones, Pérez y Carrillo, 1981.

- **Pilotes excavado con máquina rotativa.**

Estos pilotes se construyen haciendo uso de un motor, el cual hace girar una mesa o plato que tiene en su centro una abertura cuadrada, dicha mesa hace girar una barra en cuyo extremo posee una herramienta de excavación que tiene forma de cubo con dientes cortantes.

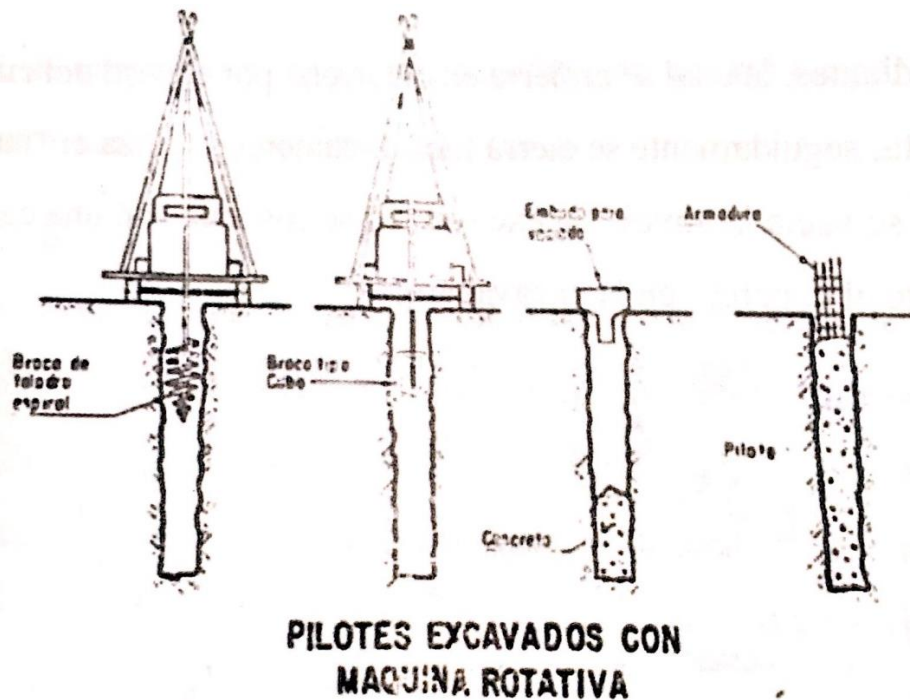


Figura 5. Pilotes excavados con maquina rotativa.

Fuente: Ingeniería de Fundaciones, Pérez y Carrillo, 1981.

- **Pilas coladas.**

Son elementos prismáticos de gran sección que trabajan lo mismo que los pilotes pero con mayor capacidad de carga debido a su gran sección. Se excavan con una almeja similar pero mayor que la del hammer-grab. Los tipos antiguos son operados por cables, pero los modernos son de mando hidráulico con una barra Kelly muy fuerte que puede ejercer empuje hacia abajo. De esta manera, mientras el tipo de mando por cables sólo cuenta para clavar los dientes de la almeja con su propio peso, el tipo de mando hidráulico agrega el empuje de la barra, con el resultado de que la excavación es más eficiente y puede vencer mejor los obstáculos que se encuentre.

Cuando se profundiza la excavación se extrae tierra mezclada con lodo y hay que agregar lodo constantemente para compensar el que se va extrayendo con la tierra de la excavación. Este último se recupera sedimentándolo en estanques especiales y filtrándolo para quitarle la tierra. Este lodo recuperado se vuelve a usar.

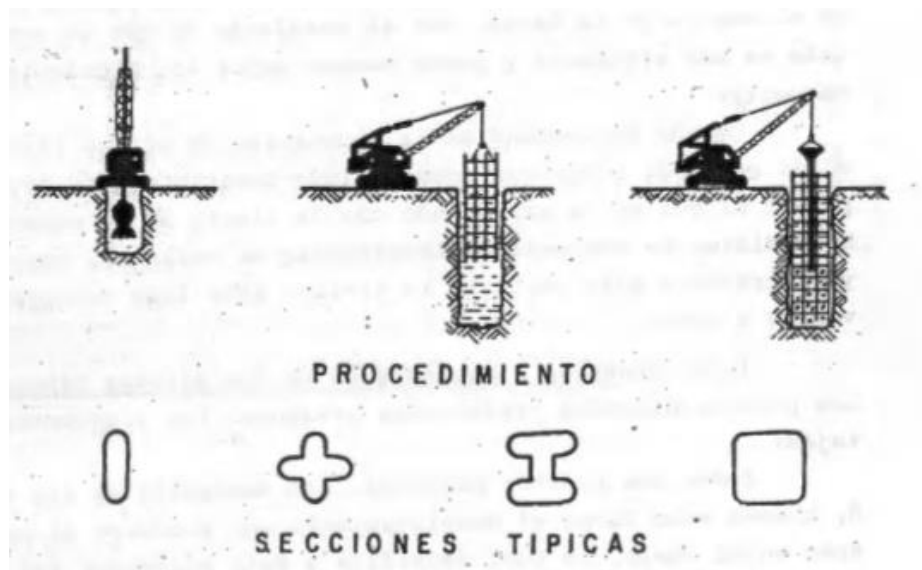


Figura 6. Pilas coladas.

Fuente: Ingeniería de Fundaciones, Pérez y Carrillo, 1981.

2.2.5 Ventajas de los pilotes excavados.

- El pilote excavado permite llevar la excavación hasta la profundidad de diseño; si existe un obstáculo, peñones o escombros, se pueden utilizar trépanos o cincheles de alta energía que permitan triturar el obstáculo, para continuar el avance de la excavación.
- Existe una amplia variedad de métodos constructivos.
- Se construyen a la medida con respecto a la longitud de diseño necesaria, razón por la cual si existe una modificación en el diseño con respecto a la longitud, se puede alargar o acortar con menos inconvenientes.

2.2.6 Desventajas de los pilotes excavados.

- Pueden generarse defectos en el pilote como estrangulamientos, interrupción del concreto, entre otros, si la excavación y el proceso del vaciado del concreto no se ejecuta con las técnicas y herramientas apropiadas.

2.2.7 Vaciado del concreto en pilotes excavados.

En cuanto al vaciado del concreto en la construcción de pilotes excavados se pueden presentar los siguientes escenarios:

- a) Vaciado en seco, sin nivel freático: para vaciar el pilote, se utiliza el embudo denominado “trompa de elefante” o embudo con toberas extremas, donde se coloca la mezcla de concreto en el embudo desde arriba y se dirige hacia abajo. La caída del concreto es el que va compactando al mismo y no se produce segregación. No es necesario el uso de tremie para pilotes de tamaños pequeños a medios, solo con el uso del embudo es suficiente para el vaciado del pilote.

En el caso de pilotes muy grandes se debe utilizar tremie. El tremie es un tubo con un embudo colocado en la parte superior, que se lleva hasta el fondo de la excavación, que se tapa en la parte inferior colocándole un tapón de madera o de plástico y se va llenando el tremie de concreto fluido, (asentamiento mayor o igual a 7 pulgadas), se levanta el tubo y la carga de concreto bota el tapón. Se debe levantar el tremie por lo menos unos 50 cm para que pueda comenzar a fluir el concreto por la parte inferior y así llevarse todo el sucio presente en la punta que puede haber quedado después de haberlo limpiado. A medida que el tremie se va halando, la excavación se va llenando de concreto.

- b) Vaciado bajo agua: para realizar el vaciado cuando hay presencia de agua se utiliza lodo bentonítico y tremie. Se va realizando la excavación y al llegar al nivel de agua se comienza a utilizar bentonita. Para la correcta preparación de la bentonita se deben cumplir con ciertos parámetros e inclusive, después de su preparación se debe tomar un tiempo para que se termine de hidratar. La bentonita se debe colocar por encima del nivel freático para siempre contar con una carga de bentonita y así continuar con la excavación. La carga de bentonita favorece a la excavación de tal manera que se evita los derrumbes.

Durante el vaciado, teniendo en cuenta que en nivel freático debe estar por debajo del nivel de bentonita, se introduce el tubo tremie hasta abajo, con su tapón, se llena de concreto y se levanta, tal como se explicó en el punto anterior, solo que en este proceso, el concreto desplaza a la bentonita a medida que desciende y va ocupando la excavación, al mismo

tiempo el embudo se va levantando tomando en cuenta que el extremo inferior si siempre este por debajo del concreto ya vaciado. La velocidad de colocación debe ser baja para evitar turbulencia o exceso de velocidad que desestabilice las paredes de la perforación. La bentonita tiende a rebosarse y para ello se debe bombear con la finalidad de recuperarla. Hay que tener en cuenta que no se debe dejar la bentonita en cualquier lugar, ya que ella es sumamente contaminante.

2.2.8 Soporte con lodo.

Para evitar el derrumbe de las paredes de la perforación se procede al uso de lodo bentonítico, compuesto por una arcilla de alta plasticidad denominada bentonita, que pertenece al grupo de las montmorilonitas, la cual presenta la expansividad típica del grupo en forma especialmente aguda, lo que resulta idóneo para la preparación de lodos de perforación, el cual forma una película de gel que sella la superficie de excavación; por su precio elevado, se reservan para mejorar en lodos ordinarios, las cantidades empleadas pueden ser las siguientes: para mejorar un lodo de 1 a 2%, para el mantenimiento de un pozo en la zona de horizontes arenosos de 3 a 4% y en el caso de pequeños desprendimientos de 2,5 a 3,5%, Cambefort (1962), Perforaciones y Sondeos, pág. 56. Al momento de la excavación cuando ya se ha alcanzado la profundidad establecida, se procede con la colocación de la armadura de acero, para luego comenzar con el vaciado de concreto por medio de una tubería que llega hasta el fondo de perforación; el concreto al ser más denso que el lodo, se mantiene separado de él y lo desplaza hasta la superficie.

Se debe llevar un procedimiento para el control de la bentonita, durante la excavación y antes del vaciado. Las pruebas que se le hacen a la bentonita son 11, las que normalmente se hacen para el tipo de lodo son: densidad, pH, contenido de arena y viscosidad.

2.2.9 Condiciones mínimas para que un pilote sea vaciado “in situ”.

- Se debe realizar la inspección de todas las fases involucradas en la construcción del pilote. La inspección debe efectuarse por personas

calificadas y con experiencia en el área, además de contar con el equipo apropiado.

- El lodo que se esté empleando en la excavación debe permanecer en todo momento a una cota superior que el nivel freático.
- Realizar una limpieza en el fondo de la excavación, debido a que una vez el pilote es cargado, se pueden producir asentamientos importantes si existe la presencia de material indeseado en la punta del pilote, dados por la compresión del mismo.
- El concreto debe estar bien dosificado y realizarse su vaciado de acuerdo a los procedimientos apropiados.
- La extracción del tremie, debe llevarse a cabo de forma controlada y siempre contando en todo momento con una carga adecuada de concreto sobre el extremo inferior del tremie.

2.2.10 Carga sobre pilotes.

La carga de trabajo de un pilote dependerá de la resistencia del suelo y de la resistencia estructural de dicho pilote. La estimación de la capacidad de carga se fundamenta en las curvas de carga-asentamiento obtenidas de las pruebas de carga. Lo primero que se debe considerar es que el comportamiento de un pilote cambia, dependiendo del tipo de suelo en que se encuentre (arena o arcilla). Cuando el pilote se encuentra en arena la falla del pilote ocurre de forma gradual, con un incremento progresivo del asentamiento, en cambio, cuando un pilote se encuentra en arcilla la falla se manifiesta por un cambio de pendiente brusco en las curvas carga-asentamiento, (Carrillo Pimentel, P., 2011, pág. 4).

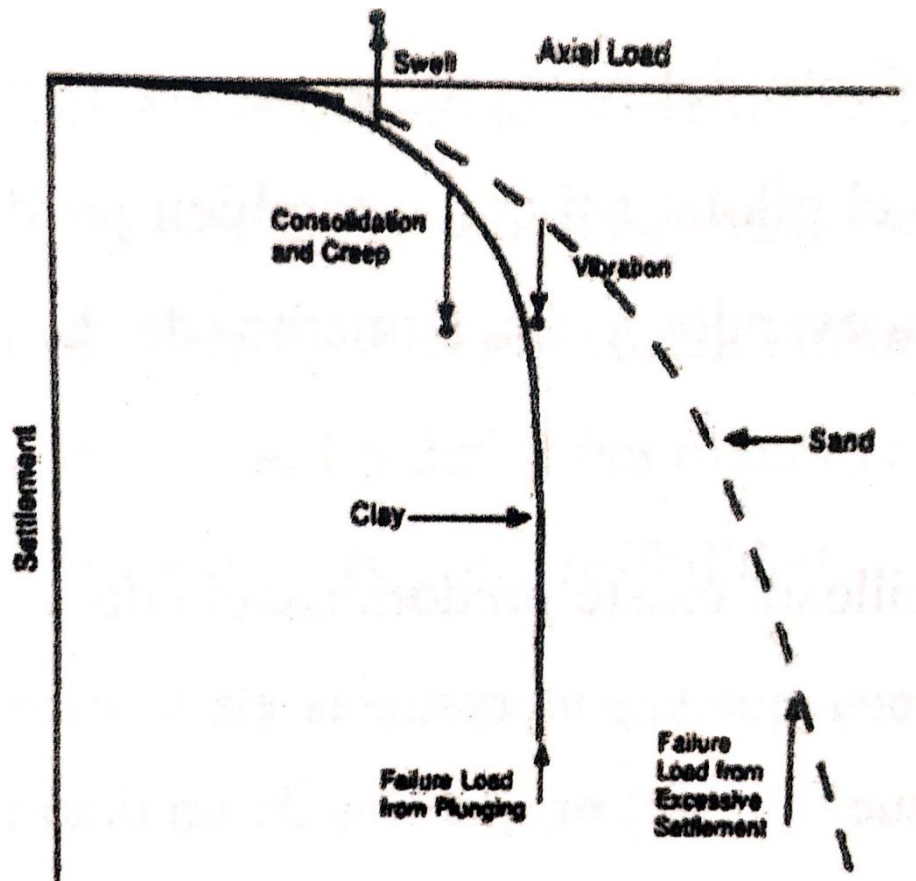


Figura 7. Curvas típicas de carga-asentamiento en pilotes excavados en arena y arcilla.

Fuente: Ingeniería en Fundaciones, Carrillo, 2011.

La capacidad de carga de un pilote depende de dos factores, la primera por la punta en compresión, que se llama resistencia a punta y la segunda, por esfuerzo cortante a lo largo de una superficie lateral, llamado comúnmente fricción lateral.

2.2.11 Capacidad Portante

La capacidad portante es el soporte que tiene el suelo de resistir las presiones que se le inducen al mismo, sin generar peligro alguno, como fallas o asentamientos considerables. Estas presiones se originan debido a cualquier estructura que se coloque sobre el suelo. Cabe destacar que al aplicar una carga de soporte con un factor de seguridad para no estar cerca de la falla, no garantiza que los asentamientos producidos por la misma, se encuentren dentro de los desplazamientos aceptables,

razón por la cual se deben realizar un análisis de asentamientos debido a que las estructuras son susceptibles a grandes asentamientos verticales.

- Capacidad Portante Última: es la máxima carga que puede soportar el suelo antes de fallar.
- Capacidad Portante afectada por factores de seguridad: también denominada carga segura, es la carga última afectada por unos factores de seguridad. Para la punta ese factor es 3 y para el fuste es 2.
- Capacidad admisible: es la menor de las cargas que resulta al comparar la capacidad afectada por los factores de seguridad con la carga que produce los asentamientos máximos a imponer en la edificación.

2.2.12 Pilotes en Arena.

Los suelos granulares tienen su capacidad de soporte gracias a la resistencia al corte generada por la fricción entre sus partículas. La característica más importante de un suelo granular como medio de fundación es la densidad relativa, ya que, el peso propio de una arena, su ángulo de fricción, el poder de soporte y la compresibilidad son función de ésta; por otro lado los valores absolutos de compresibilidad y fricción varían también en función de la gradación y de la angularidad de los granos de arena. En definitiva mientras mayor sea la densidad relativa, mayor será su ángulo de fricción y menor su compresibilidad.

La resistencia a la falla de un cimiento fundado en arena, proviene de dos factores; el primero es la resistencia al corte situada debajo de la base del cimiento, y el segundo la resistencia por el peso de la sobrecarga que actúa por encima de la base del cimiento (Pérez y Carrillo, 1981, pág. 48). Por otra parte el valor del asentamiento que experimenta el suelo sometido a una carga, dependerá de la intensidad de dicha carga y de la compresibilidad del suelo. En el caso de pilotes en arena su capacidad de soporte a la falla se compone de la resistencia de punta y la resistencia de fricción lateral.

Los suelos arenosos casi siempre cuentan con cierto porcentaje de fracción de fina de limos y arcillas, pero continua en predominancia la arena, por lo cual estas partículas finas no confieren características cohesivas al suelo. Los limos al ser

suelos finos de poca o ninguna plasticidad, su presencia en suelos arenosos no le confieren ninguna cohesión, mientras que el porcentaje de limos sea bajo, de ser alto la cantidad de limos en la arena tienen a disminuir su ángulo de fricción interna.

2.2.13 Fundaciones en arcilla.

En el caso de pilotes en arcilla, su capacidad de soporte a la falla se compone de la resistencia de punta y la resistencia por adherencia lateral, la cual es función de la resistencia al corte de la arcilla, Pérez y Carrillo, 1981. En el caso de pilotes excavados, por efecto del proceso de excavación, se perturba la arcilla en una capa que estará en contacto con el pilote, así como también produce que la arcilla drene hacia la cara de la excavación conllevando a un aumento de la humedad y ocasionando su debilitamiento.

Cuando en un suelo arcilloso existe predominancia de arcilla con cierto porcentaje de arena, dichas partículas de arena quedan incrustadas en la masa de arcilla y no afectan el comportamiento del suelo, mientras que cuando un limo contenido en una arcilla muy limosa ocasionara la disminución de la resistencia al corte del suelo, aun cuando este se siga considerando como arcilla.

2.2.14 Ensayos de Carga en pilotes.

Los ensayos de carga en pilotes forman parte de los controles de calidad que se le aplican a un pilote para determinar tanto su integridad estructural como su capacidad de carga; también para determinar si un pilote o grupo de pilotes es capaz de soportar una carga sin asentamientos excesivos o continuos. Existen muchos tipos de pruebas o ensayos de carga pero en este TEG nos enfocamos en dos: el ensayo de carga estático y el ensayo de carga dinámico.

Estos ensayos deben realizarse después en un periodo de tiempo tal que se haya logrado un reacomodo de las partículas y la disipación de poros en el suelo luego de haber alterado la estructura del suelo por medio de la colocación del pilote, este tiempo varía entre uno y tres meses dependiendo del perfil geotécnico del suelo.

2.2.14.1 Ensayos estáticos.

El ensayo estático consiste en la determinación de la capacidad de punta y fricción a través de la transferencia de carga mediante un gato hidráulico. Este tipo de carga puede o no ser destructivo dependiendo de la carga total aplicada en el pilote. En esta prueba, el pilote es cargado progresivamente hasta la carga prevista para el desarrollo del ensayo, y se van midiendo los asentamientos con cada nivel de carga. Se estila llevar el pilote al doble de la carga de servicio estimada, sin llegar a la falla. En el caso de ser una prueba destructiva, se debe realizar la prueba en un pilote externo cercano a la obra.

En la figura 8, se muestra el esquema de un ensayo de carga estática, donde se observa un pilote de prueba cargado por un gato hidráulico que transmite la fuerza obtenida por la carga de una viga anclada en sus extremos por dos pilotes, de esta manera al hacer funcionar el gato hidráulico, esta fuerza se transmite directamente al pilote que se está ensayando.

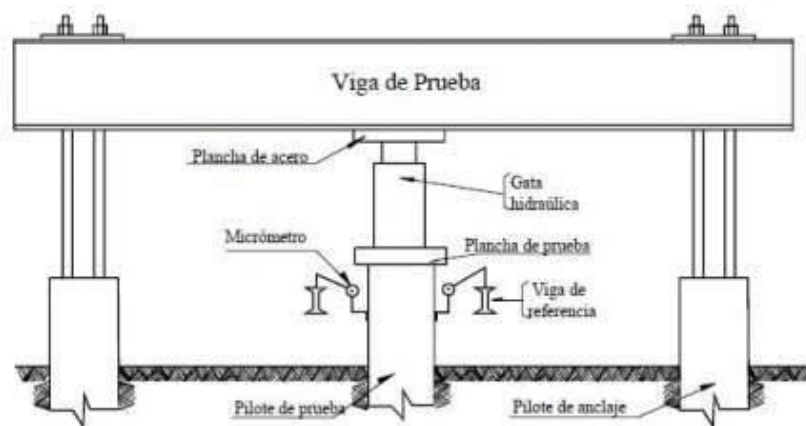


Figura 8. Esquema de pruebas estáticas.

Fuente: “Pruebas de carga estáticas (SLT) de pilotes”, CFT & Asociados, S.L, (2013).

2.2.14.2 Ensayos dinámicos.

El ensayo de carga dinámica, consiste en golpear al pilote dejando caer un martillo, lo cual produce ondas que viajan tanto en el martillo como en el pilote.

Debido a la energía transmitida por el martillo, el pilote se asienta con una componente permanente y una elástica.

En una prueba dinámica de baja energía, se necesitan instrumentos como acelerómetros y geófonos que se instalan en la parte superior del pilote, para poder realizar mediciones de factores que se generan por las ondas inducidas dentro del miembro; también es necesario contar con instrumentos topográficos que midan el asentamiento del pilote, una vez que este es golpeado (ver la figura 9). De esta manera se puede estimar con bastante precisión tanto la capacidad de fuste como la capacidad de punta del pilote, para un asentamiento dado. Además se puede determinar si existen malas formaciones en el cuerpo del pilote.

Las medidas que se deben extraer de la prueba son la aceleración del pilote, la altura de caída del martillo, el tiempo de viaje de la onda en el pilote y el asentamiento final o permanente después de haber golpeado el elemento.

En una prueba dinámica de alta energía se pueden generar esfuerzos de impactos importantes que pueden llegar a dañar la cabeza o la punta del pilote. Si la prueba es de baja energía no se puede hacer fallar el pilote. Si es hinca con el martillo de alta capacidad, hay que hacer penetrar en el suelo, del orden centimétrico. Similarmente, es conveniente proteger la zona donde impacta el martillo porque allí se generan esfuerzos de impacto importantes que pueden dañar la cabeza del pilote.

En el ensayo dinámico de baja energía, a diferencia del ensayo estático, no es destructivo, lo que nos permite realizar la prueba directamente a pilotes que se encuentren dentro de la obra en ejecución, evitando así construir pilotes externos para el recaudo de información. Gracias a esta gran ventaja, esta prueba está siendo más utilizada que otras.

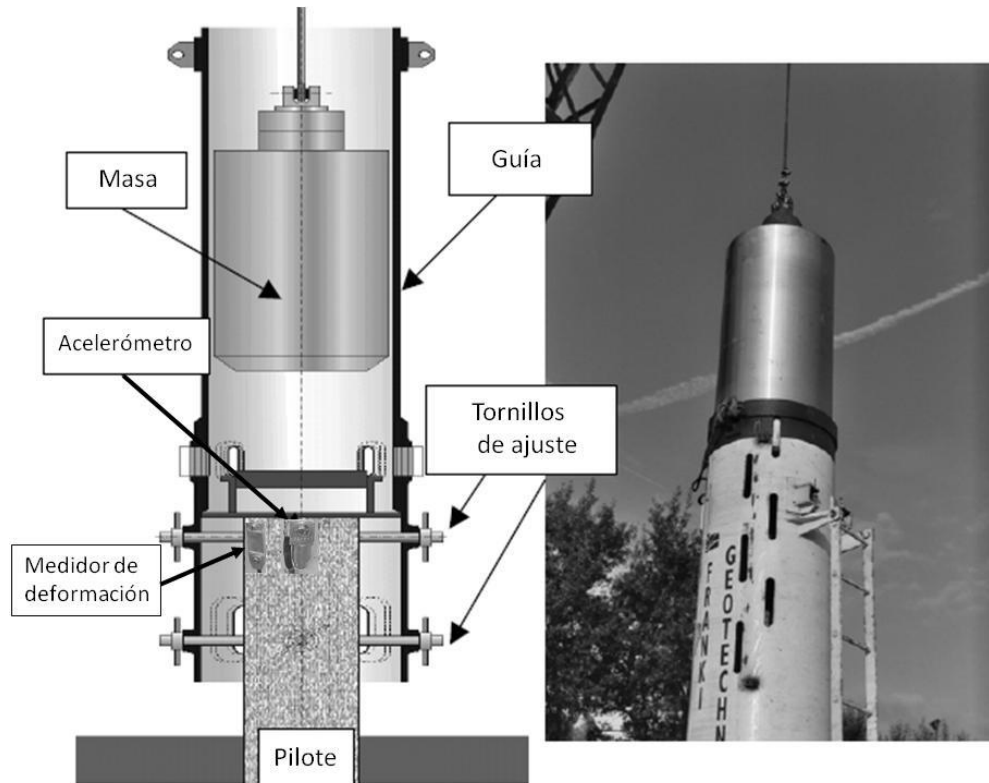


Figura 9. Prueba dinámica en pilote terminado, mediante golpe de una masa denominada martillo.

Fuente: Pruebas estáticas y dinámicas en pilotes. Apuntes del profesor Heriberto Echezuria.

2.2.15 Onda de compresión

Onda que, en un medio elástico, ocasiona la variación de volumen de elementos del medio sin provocar su rotación.

2.2.16 Amortiguamiento

Se define al amortiguamiento como la pérdida de energía de un sistema de carga cíclico usualmente disipada en forma de calor o desplazamiento.

2.2.17 Frecuencia

Número de ciclos en un segundo de una corriente eléctrica alterna. Es la inversa del periodo.

2.2.18 Amplitud

En física la amplitud de un movimiento ondulatorio es una medida de la variación máxima del desplazamiento u otra magnitud física que varía periódica o cuasi-periódicamente en el tiempo. Es la distancia entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio o medio.

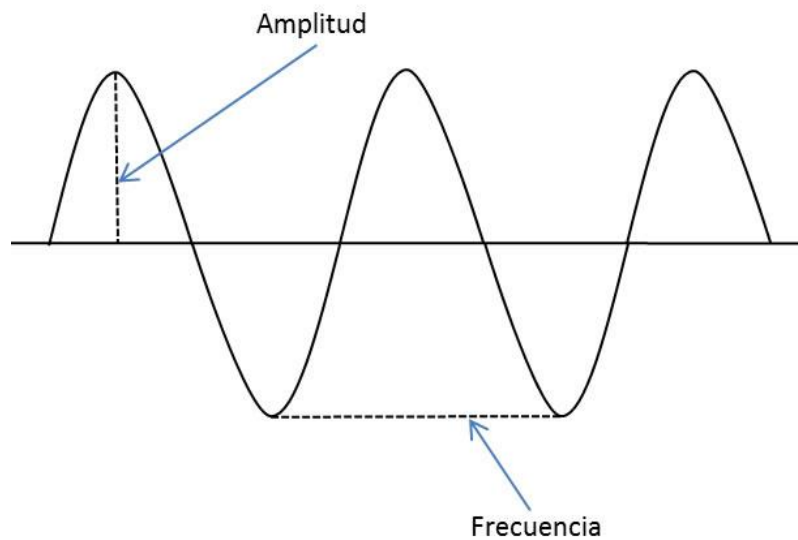


Figura 10. Representación gráfica de amplitud y frecuencia.

Fuente: propia de los autores.

2.2.19 Impedancia

Se refiere a la disipación de energía que se genera en el traspaso de onda de un cuerpo a otro con características distintas.

2.2.20 Lazo de histéresis

Es la representación de una curva esfuerzo deformación que incluye cargas en ambas direcciones. Un lazo de histéresis representa cualquier ciclo de carga y descarga que invierta los esfuerzos en la misma magnitud. Cabe destacar que todo ciclo comienza y termina en la curva denominada Backbone.

2.2.21 Energía potencial

La Energía Potencial es la capacidad que tiene un cuerpo para realizar un trabajo de acuerdo a la configuración que ostente en el sistema de cuerpos que

ejercen fuerzas entre sí, es decir, la energía potenciales la energía que es capaz de generar un trabajo como consecuencia de la posición de un cuerpo.

2.2.22 Energía cinética

La energía cinética de un cuerpo es aquella energía que posee debido a su movimiento. Se define como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa determinada desde el reposo hasta la velocidad indicada.

2.3 Bases Teóricas.

En este aparte se señalan los fundamentos teóricos que orientaron este trabajo de investigación. En relación a ello, es importante hacer notar que los criterios que se tomaron en cuenta para la selección de las áreas temáticas han sido: la relevancia, actualidad, pertinencia y coherencia con los objetivos de la investigación.

2.3.1 Leyes de Newton.

Las Leyes de Newton, también conocidas como Leyes del movimiento de Newton, son tres (3) principios a partir de los cuales se explican la mayor parte de los problemas planteados por la dinámica, en particular aquellos relativos al movimiento de los cuerpos. Estas leyes son las siguientes:

- Primera Ley - Ley de la inercia: todo cuerpo permanece en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme a menos que otros cuerpos actúen sobre él.
- Segunda Ley- Definición de la fuerza: la fuerza es igual a la masa por la aceleración producida en el cuerpo.
- Tercera Ley - Ley de acción y reacción: Por cada acción, hay una reacción igual y de signo opuesto.

2.3.2 Distribución de cargas en pilotes (punta y fricción) en ensayos estáticos.

En el pilote la resistencia de fricción aparece muy temprano y se desarrolla completa a medida que el pilote se comienza a asentar, es decir, para desplazamientos bajos a medios, se desarrolla toda la resistencia de fricción. La resistencia de punta aparece más tarde cuando hay asentamientos excesivos en el pilote y ya la fricción pasa a ser residual, tal como se observa en la figura 11.

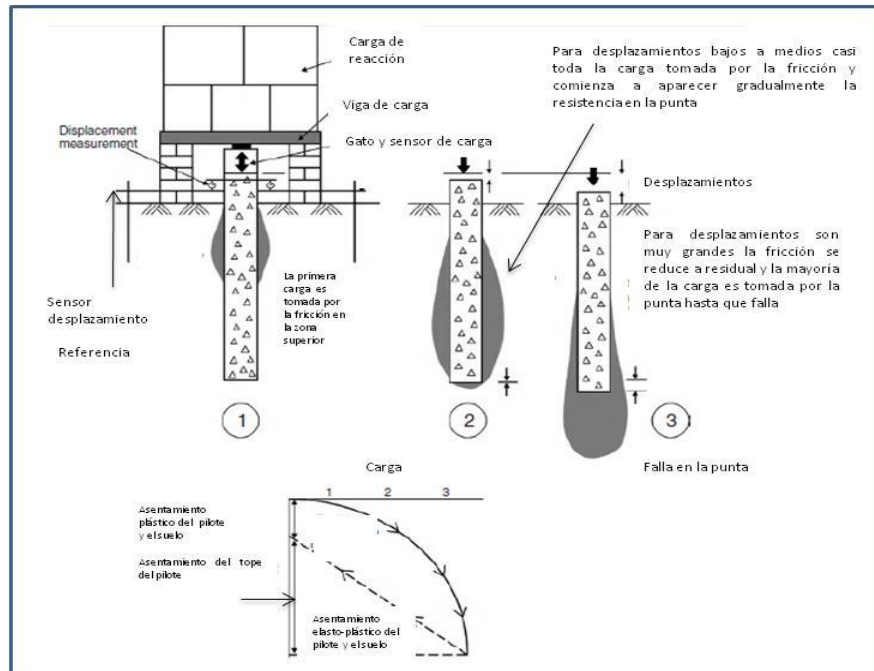


Figura 11. Aparición progresiva de los esfuerzos de punta y fricción en relación al desplazamiento, utilizando el ensayo estático.

Fuente: Pruebas estáticas y dinámicas en pilotes. Apuntes del profesor Heriberto Echezuria.

2.3.3 Curvas de Reese y O'Neill y Norma API RP 2 A.

Con la información de un gran número de ensayos estáticos, se logró documentar de forma acertada el comportamiento de pilotes en arenas y arcillas en función de su desplazamiento al aplicarle una carga. Estos estudios fueron desarrollados por los investigadores Reese y O'Neill, obtenidas de Braja Das (2001) "Fundamentos de la ingeniería Geotécnica", 7ma edición, los cuales por medio de gráficos, muestran la resistencia de un pilote en relación a la resistencia máxima teórica calculada contra el asentamiento relacionado con el diámetro del pilote.

Las siguientes imágenes muestran las curvas obtenidas en esta investigación, los cuales representan la relación que hay entre la carga aplicada y el desplazamiento. Las curvas de la derecha son propuestas para suelos arcillosos, mientras que las curvas de la izquierda son para suelos arenosos, siendo las superiores las correspondientes a la capacidad de fuste y las inferiores a la capacidad por punta.

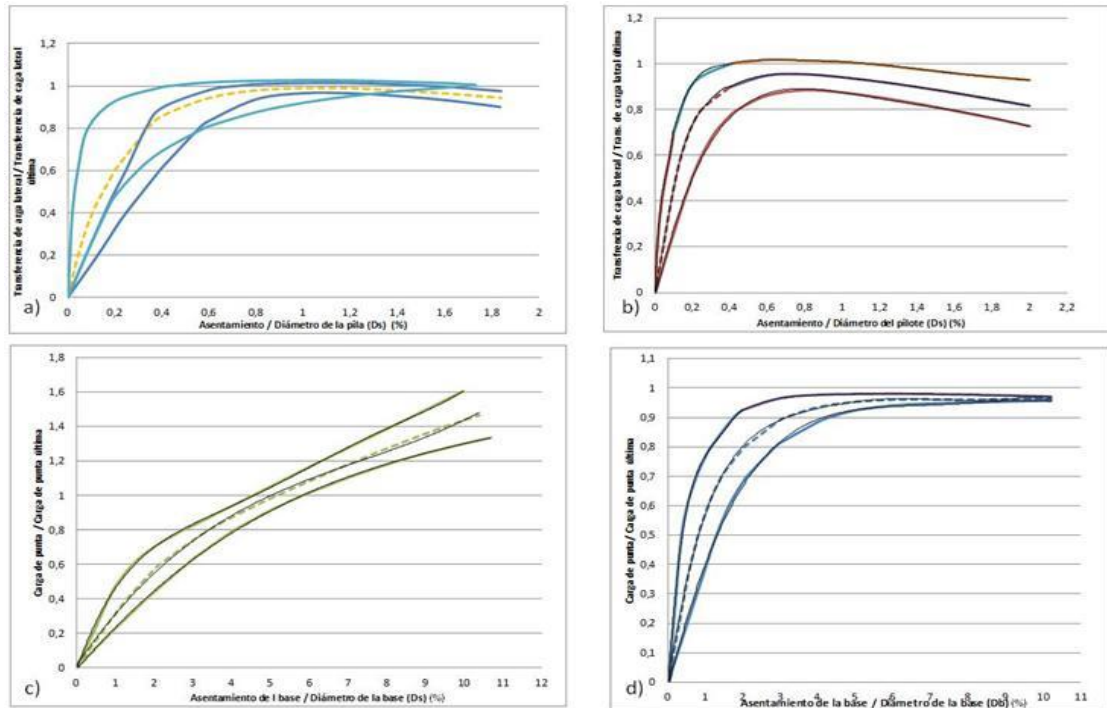


Figura 12. Curvas de Reese O'Neill.

Fuente: Braja Das (2001) "Fundamentos de la ingeniería Geotécnica", 7ma ed.

Mediante las gráficas podemos observar que para relaciones asentamiento – diámetro bajas la capacidad por fricción se desarrolla completamente, encontrándose en el orden del 0,3% al 0,4%. Para este rango podemos observar que la capacidad de punta apenas se inicia. A medida que la relación asentamiento-diámetro aumenta la capacidad por punta empieza a ser más significativa.

Para verificar lo dicho anteriormente, si le asignamos un valor al diámetro de 1000 mm, podemos observar que la capacidad de fuste se desarrolla completamente para un asentamiento de 4 mm tanto en arenas como en arcillas; mientras que para que la capacidad por punta se desarrolle completamente hacen falta asentamientos que se encuentren alrededor de los 4,5 cm en arenas y 3 cm en arcillas. Estos últimos asentamientos pueden ser excesivos para una estructura. Generalmente se diseña para asentamientos que no superen los 2,5 cm.

Una vez más podemos constatar que la capacidad por fuste es la primera en generarse, ya que se desarrolla para asentamientos de baja a media magnitud y por lo general los asentamientos en las estructuras se encuentran alrededor de este rango.

La norma API RP 2 A ha normalizado las curvas de los investigadores Reese y O'Neill las cuales se incluyen en la figura 13 y 14 para fuste y punta, respectivamente.

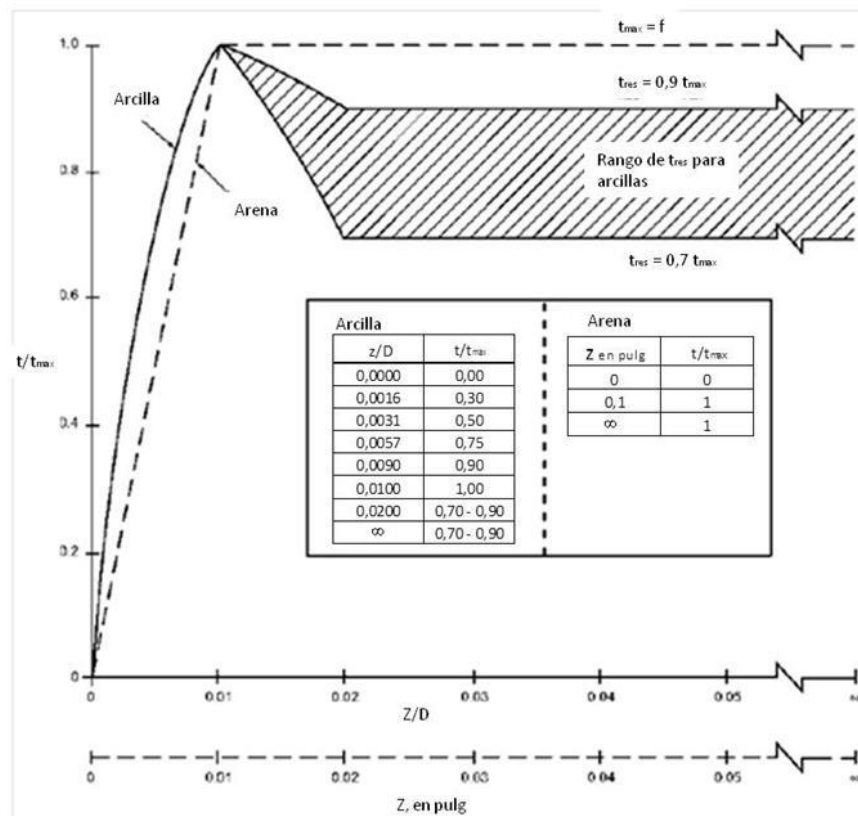


Figura 13. Curvas normalizadas de resistencia lateral con asentamiento para arenas y arcillas, denominadas, t - z .

Fuente: norma API RP 2 A.

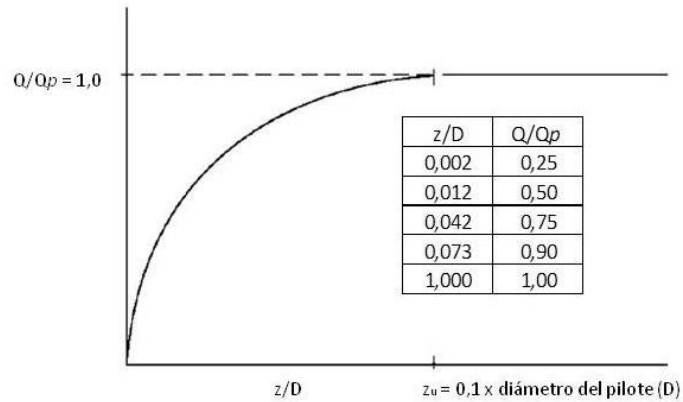


Figura 14. Curvas normalizadas de resistencia de punta con asentamiento para arenas y arcillas, denominadas, Q-z.

Fuente: norma API RP 2 A.

De acuerdo con lo contemplado en los apuntes del ingeniero investigador Heriberto Echezuria, si utilizamos las recomendaciones de la norma API RP 2 A para un suelo cohesivo y uno no cohesivo y las formulas teóricas incluidas en dicha norma, se obtienen los gráficos incluidos en las ilustraciones 15 y 16.

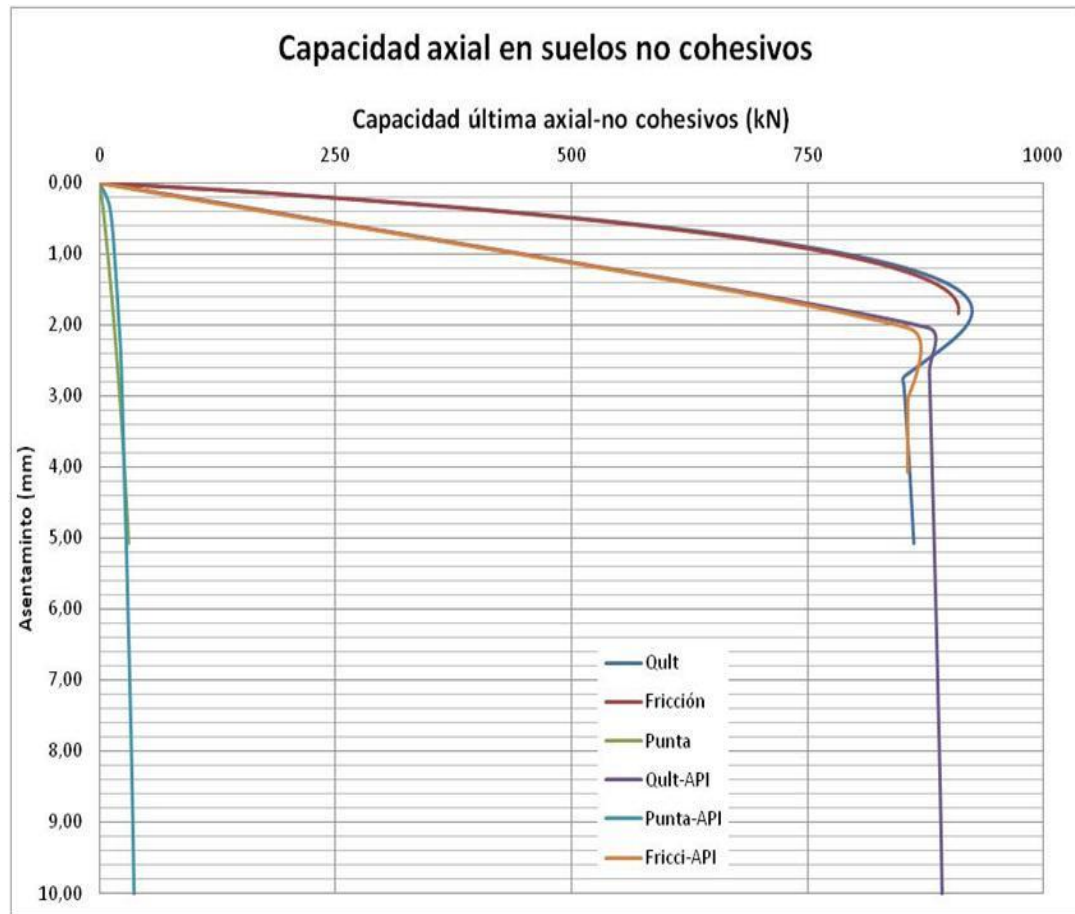


Figura 15. Curvas de resistencia de fricción y punta con asentamiento para arenas.
Según la Norma API RP 2 A.

Fuente: Apuntes del Ingeniero Heriberto Echezuria, Universidad Católica Andrés Bello.

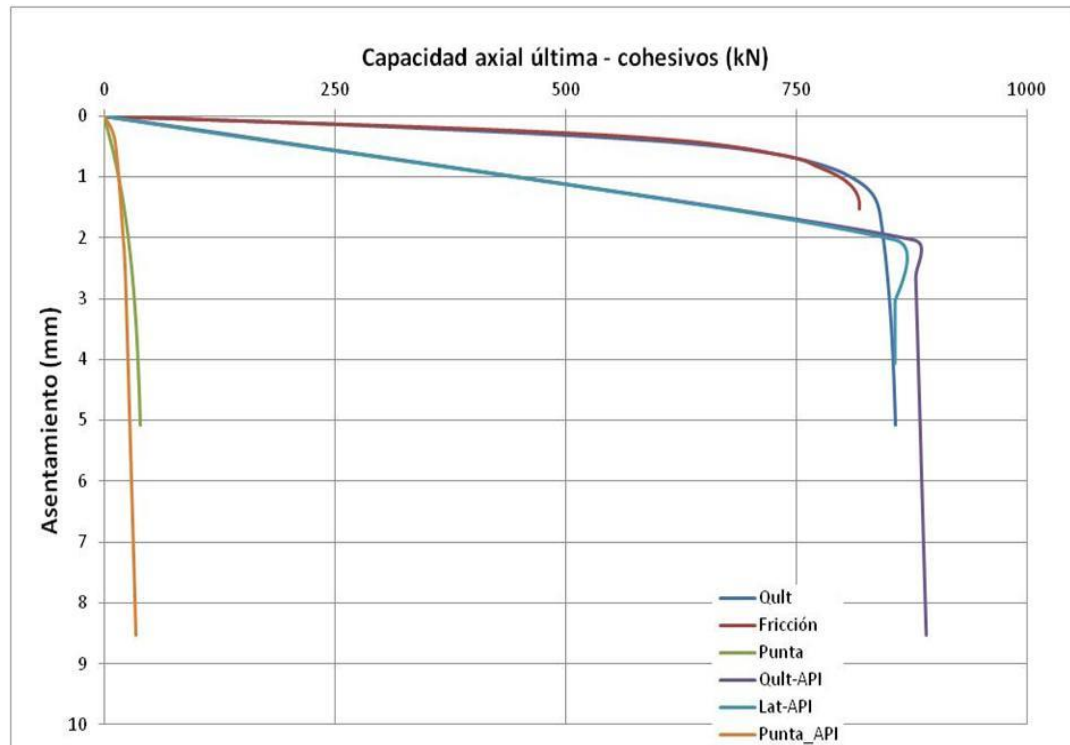


Figura 16. Curvas de resistencia de fricción y punta con asentamiento para arcillas según la norma API RP 2 A.

Fuente: Apuntes del Ingeniero Heriberto Echezuria, Universidad Católica Andrés Bello.

Aquí se puede destacar que a pesar de la diferencia en el comportamiento de ambos suelos, la capacidad de fricción es mucho mayor para los asentamientos que son típicos para pilotes cargados en condiciones de capacidad admisible. Para asentamientos en el orden de 2 mm se puede apreciar que la contribución de la punta es muy baja en comparación con la capacidad por fricción.

2.3.4 Aspectos teóricos y distribución de fuerzas en el ensayo dinámico.

Cuando se golpea al pilote con el martillo, se generan ondas tanto dentro del martillo como en el pilote que hace que el mismo se comprima. Mientras el martillo y el pilote están en contacto, las ondas que viajan en el martillo le entregan la energía de dicha onda al pilote, tal como se muestra en la figura 17.

Entonces, una vez dado el golpe se generan las repetidas incursiones de la onda en el martillo que son las que producen la fuerza dentro del pilote. A su vez se genera una onda que viaja dentro del pilote en un tiempo determinado. El tiempo de

viaje de esta onda dentro del pilote controla la cantidad de energía que entrega el martillo al pilote. La fuerza de impacto del martillo también genera una componente inercial en el pilote, la cual hace que el pilote adquiera velocidad. La combinación o suma de ambas componentes hace que el elemento descienda y se produzca un desplazamiento (AL). Este desplazamiento ocurre a causa de la fuerza total inducida que es la que causa la rotura del suelo. Si el desplazamiento es alto el pilote sigue penetrando pero si el mismo es bajo a muy bajo indica el rechazo.

La pérdida de energía en la punta del pilote, es causada por la relación de impedancia en la punta del pilote y la reacción dinámica del suelo, mientras que en la zona del golpe dicha pérdida está asociada con la elasticidad del material del pilote y las condiciones en la zona de impacto.

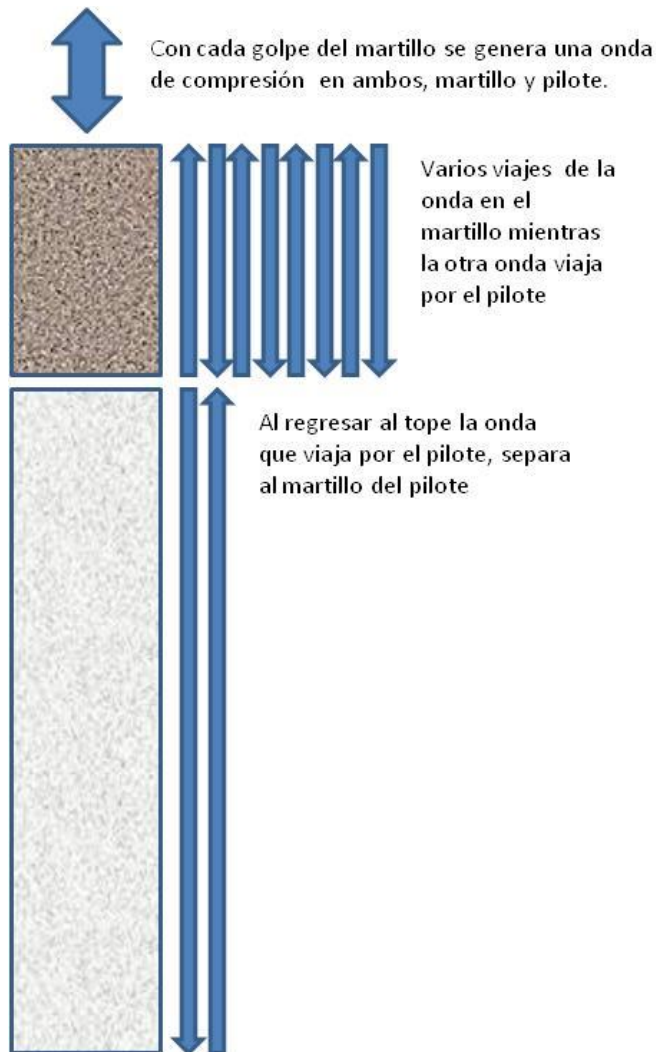


Figura 17. Esquema del proceso de generación de ondas de compresión en el pilote y en el martillo durante el ensayo de carga dinámica.

Fuente: Pruebas estáticas y dinámicas en pilotes. Apuntes del Ingeniero Heriberto Echezuria.

Esta fuerza inducida por el golpe del martillo, la llamaremos $F_{(t)}$ y es la resultante de las dos (2) fuerzas antes mencionadas que actúan sobre pilote en el momento del golpe. Una es la fuerza inercial, denominada F_m y la otra es la fuerza de compresión inducida por la onda F_c . Tal como mencionamos, es la combinación o suma de ambas fuerzas, $F_{(t)}$ lo que hace penetrar al pilote cuando ambas actúan al mismo tiempo Sin embargo ellas están desfasadas un tiempo de $2L/C$, como se observa en la figura 18. Ese valor, $2L/C$, es el tiempo que tarda la onda en viajar

desde la parte superior del pilote hasta la punta del mismo y regresar nuevamente al tope.

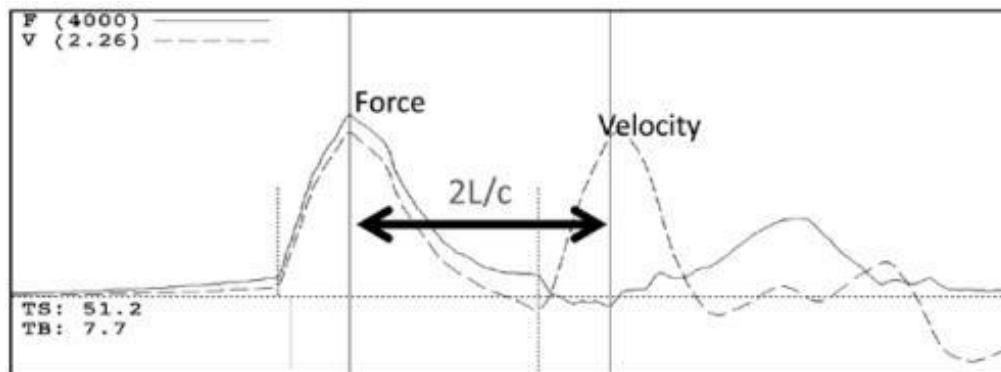


Figure 3: Force-Velocity signals from PDA

Figura 18. Desfase entre la fuerza de compresión y la fuerza de inercia, generadas por la onda compresiva.

Fuente: Ingeniero Evgenia Anna Sellountou, "Quality Management by Means of Load Testing and Integrity Testing Of Deep Foundations"

$$t = \frac{2L}{C}$$

Siendo:

- L = longitud del pilote
- C = velocidad del frente de ondas de compresión en el pilote.

Esto quiere decir que una fuerza se desarrolla mucho más rápido que la otra. Generalmente la fuerza de compresión, que se produce por la velocidad de la onda, ocurre más rápido que la fuerza inercial.

Fuerza de inercia (F_m)

Es la fuerza que saca de la inercia al pilote. Es la que hace que el pilote se mueva ya que lo impulsa hacia abajo, haciéndole perder la inercia que posee cualquier cuerpo que se encuentre en reposo. También podemos denominarla como "Fuerza de Newton".

$$F_m = m_p * a_p$$

Fuerza de compresión inducida por la onda (Fc)

Es la fuerza producida por la velocidad del frente de ondas que hace que el pilote se comprima y se expanda a medida que la onda avanza y se refleja como onda de extensión. Se denomina así, ya que cuando se tiene una fuerza aplicada sobre un elemento estructural, este se comprime produciendo el acortamiento del material.

Existe una ecuación de referencia dinámica que la establecieron Timoshenko y Goodier (1970), que establece lo siguiente: esta fuerza de compresión inducida por la onda multiplicada por la velocidad del frente de onda es igual (proporcional) a la velocidad de deformación del concreto del pilote por la rigidez axial. Es decir, cómo se mueve el pilote como cuerpo rígido a la velocidad inducida por el golpe. Gracias a ello se genera la siguiente ecuación:

$$E * A * v_m = F_t * C$$

De aquí podemos despejar la fuerza del frente de ondas. Nótese que dicha fuerza es proporcional a la velocidad multiplicada por las propiedades del medio (E, A y c)

$$F_t = \frac{E * A * v_m}{C}$$

Siendo

- E = módulo de elasticidad del material del pilote
- A es el área transversal del pilote
- v_m es la velocidad de deformación del concreto del pilote, medida durante el golpe del martillo.
- C es la velocidad del frente de onda (por lo general si el medio es concreto este valor es 4000 m/seg y si es acero es 6000m/seg).

Ahora bien, según indica Timochenko, esas fuerzas tienen que promediarse, debido a que la fuerza de compresión producida por la onda medida en cualquier parte del pilote en un tiempo cualquiera tiene componentes en ambas direcciones. En algún caso o momento las dos (2) van a coincidir, entonces ahí la fuerza es máxima, pero en la mayoría de los casos ellas están desfasadas, entonces debo hacer la suma

de ambas y promediarlas, y esa será la fuerza total que estará actuando sobre el elemento.

$$F_{\downarrow} = \frac{F_m + Z v_m}{2}$$

$$F_{\uparrow} = \frac{F_m - Z v_m}{2}$$

Nótese que en esta ecuación la fuerza de compresión inducida por la onda es calculada como $Z v_m$, lo cual viene de la ecuación despejada de Timoshenko y Goodier, considerando que:

$$Z = \frac{E * A}{C}$$

Z es conocida como impedancia del material.

Al final resulta que la fuerza general inducida por el golpe del martillo hacia el pilote es:

$$F_{(t)} = \frac{F_m + Z v_m}{2} + \frac{F_m - Z v_m}{2}$$

2.3.5 Análisis de fuerzas dentro del pilote.

Cuando se realiza el ensayo dinámico de baja energía y se golpea el pilote con el martillo, se producen una serie de fuerzas dentro del pilote, debido al paso de la onda generada por el impacto. Estas fuerzas, son fuerzas dinámicas, razón por la cual la reacción que tendrá el suelo debe tener una componente dinámica. Entonces, cuando se desarrolla el ensayo, se producen las fuerzas internas dentro del pilote y al mismo tiempo se desarrollan las componentes estáticas (R_{SS}) y dinámicas (R_{SD}), de la resistencia del suelo. La sumatoria de ambas, será la resistencia total (R_{TOTAL}) del suelo.

$$R_{TOTAL} = R_{SS} + R_{SD}$$

Realizando un diagrama de cuerpo libre del elemento, tenemos por equilibrio de fuerzas, que la suma de las fuerzas internas dentro del pilote, debe ser igual a la resistencia total del suelo.

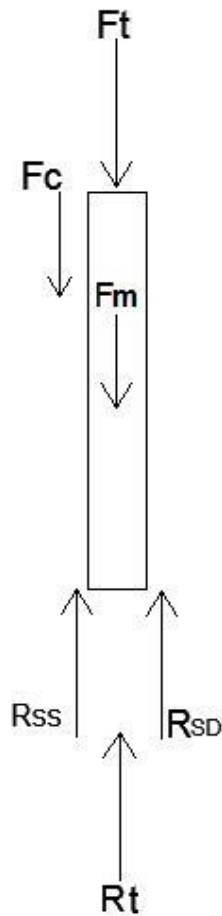


Figura 19. Análisis de fuerzas producidas en el pilote, mediante un diagrama de cuerpo libre.

Fuente: propia de los autores.

$$R_{SS} + R_{SD} = F_{(t)}$$

$$R_{TOTAL} = F_{(t)}$$

2.3.6 Reacción Estática del suelo (Rss)

La reacción estática del suelo, es la sumatoria de la resistencia de punta y la resistencia del fuste del pilote.

$$R_{SS} = Q_{punta} + Q_{fuste}$$

Para el ensayo dinámico de baja energía, los desplazamientos son bajos, ya que está directamente relacionado, el asentamiento con la fuerza que se le induzca al pilote. Si la energía es baja, los asentamientos serán bajos y se debe considerar que

para esta condición, la reacción del fuste estática es la que más se desarrolla con respecto a la punta, debido a que la punta se desarrolla para asentamientos más elevados.

2.3.7 Reacción dinámica del suelo (R_{SD})

La resistencia dinámica del suelo depende del amortiguamiento del suelo inducido por la velocidad de penetración en la punta del pilote. Entonces nos queda que la reacción dinámica del suelo es igual a:

$$R_{SD} = \dot{C} * v_B$$

Siendo v_B la velocidad a la que se está moviendo la punta del pilote para desplazar todo el suelo que se encuentra debajo del elemento. Esta velocidad ocurre en un tiempo t_3 . Este tiempo es relativamente bajo, desde el punto de vista de desplazamiento del pilote.

$$v_B = \frac{\Delta l}{t_3}$$

El amortiguamiento ($\dot{C}$) depende del tipo de suelo y de la frecuencia de vibración. Se puede expresar el amortiguamiento como el múltiplo entre la frecuencia de vibración y dos (2) veces la masa, tal como contempla la siguiente ecuación:

$$C = 2 m w$$

2.3.8 Comparación entre el ensayo estático con el ensayo dinámico de baja energía.

De acuerdo con lo contemplado en los apuntes del ingeniero Heriberto Echezuria, la energía dinámica que el pilote le transmite al suelo, al momento del impacto con el martillo tiene una componente plástica y otra elástica. El efecto que la componente plástica tiene en el suelo es la deformación permanente que este sufre durante el ensayo, mientras que el paso de la onda forma parte de la componente elástica. Se debe tomar en cuenta que existe una componente estática dentro de la reacción dinámica, como se muestra en la figura siguiente. En este esquema se puede

observar que esta reacción dinámica es la estática multiplicada por un factor de amplificación dinámica.

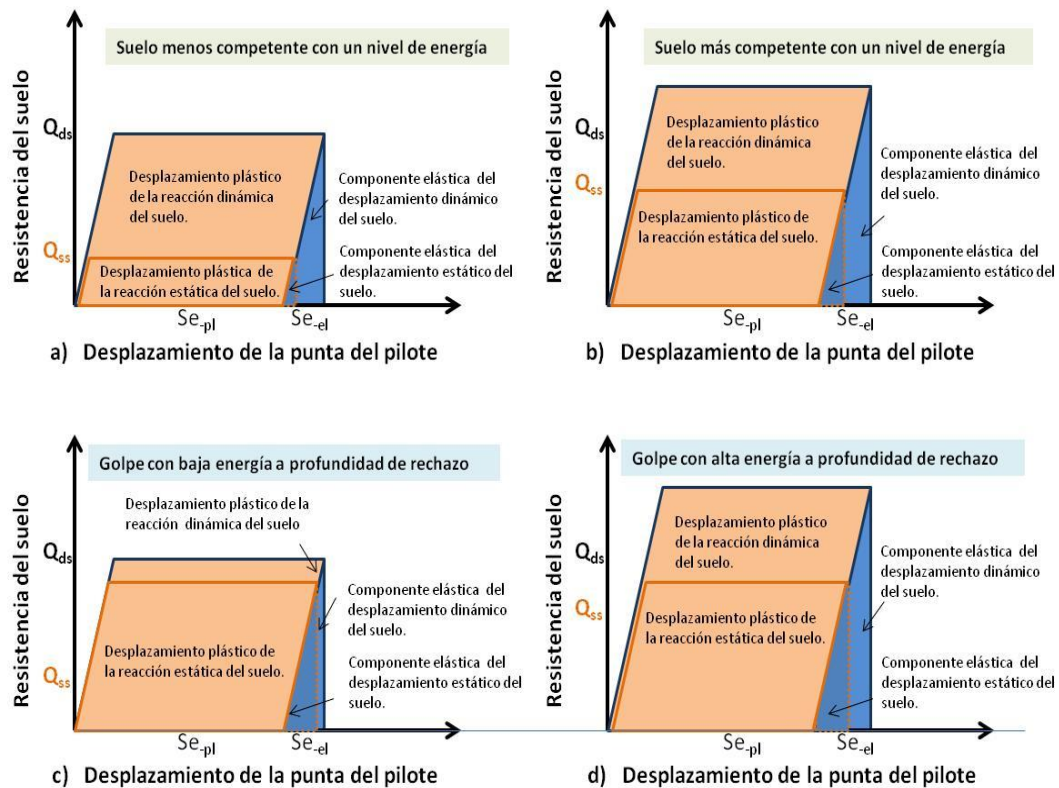


Figura 20. Esquema del proceso de transmisión de la energía del pilote al suelo en cada impacto.

Fuente: Apuntes del ingeniero Heriberto Echezuria.

Cuando aplicamos un nivel cualquiera de energía a un suelo poco competente, tal como se muestra en la figura a), la mayor parte de la deformación del suelo es plástica y la punta del pilote tiene poca oposición al desplazamiento de parte del suelo. Sin embargo, si mantenemos el mismo nivel de energía y el suelo es más competente, como en la figura b), entonces ambas reacciones aumentan, y la mayor parte de la deformación sigue siendo plástica aunque esta vez aumenta la componente estática comparándolo con el caso anterior.

En la figura c) se puede observar que cuando se alcanza la profundidad de rechazo y se aplica un nivel bajo de energía, la componente estática crece y la deformación elástica de la carga dinámica decrece debido a que resulta más difícil romper el suelo.

Si se aumenta la energía a la profundidad de rechazo, la respuesta estática se mantiene pero la dinámica aumenta, la cual permite que rompa el suelo y el pilote continúe con su desplazamiento. Lo que ocasiona que la deformación plástica aumente en comparación con el caso anterior. Este aparte se ilustra en la figura d).

Es importante destacar que a la profundidad de rechazo y aplicando baja energía el proceso de carga asentamiento dinámico del pilote se aproxima mucho al caso con carga estática por lo que se podrían aplicar las curvas de Reese y O'Neill para estimar la capacidad del pilote si se mide el desplazamiento del mismo al final de la carga.

Se puede decir que inducir niveles de baja energía al miembro, generan asentamientos bajos. De acuerdo con Nicolas Charue (2004), quien realizó una comparación entre el ensayo dinámico y el ensayo estático realizado en pilotes iguales de 400 mm de diámetro, para una profundidad de rechazo, se pudo observar que la capacidad medida mediante pruebas dinámicas coincide bastante bien en las primeras etapas de la prueba estática, hasta un asentamiento aproximado de 2mm. Es bueno destacar que la prueba dinámica se realizó dando repetidos golpes cada vez con más energía al pilote midiendo en cada uno el desplazamiento y para golpes inducidos de baja energía, que generan asentamientos pequeños, las curvas de capacidad – asentamiento para cada ensayo coinciden perfectamente, tal como se muestra en la siguiente figura.

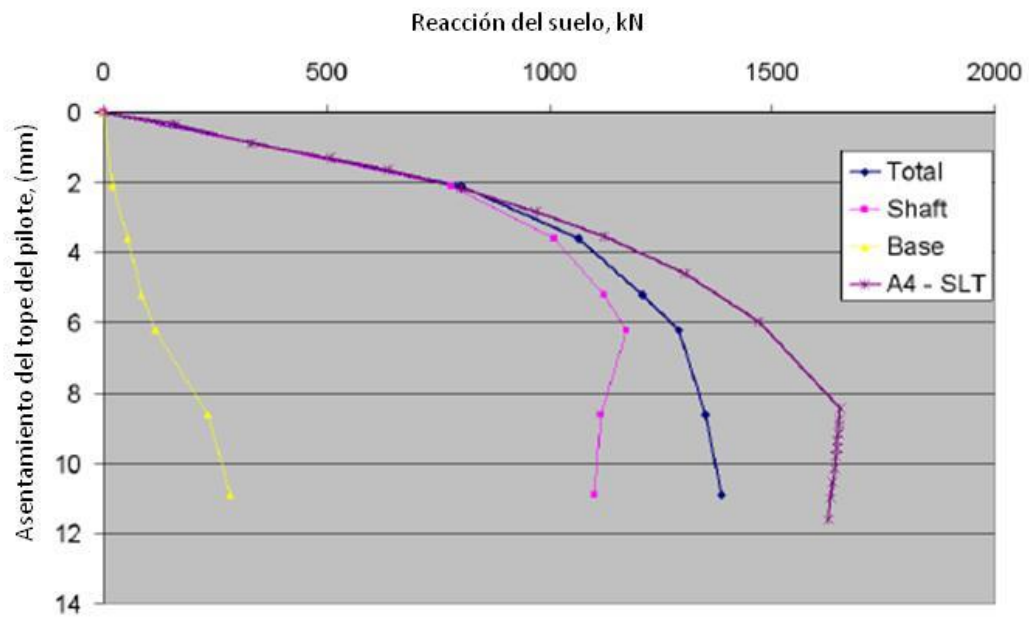


Figura 21. Comparación de capacidades medidas en pilotes idénticos ensayados con pruebas de carga estática y con pruebas dinámicas

Fuente: "Loading rate effects on pile load displacement behavior derived from back-analysis of two load testing procedures" Nicolas Charue (2004).

Si nos quedamos en el rango estático del ensayo dinámico, es decir, el rango donde se producen asentamientos pequeños para niveles de energía bajo, ahí es donde se puede despreciar la reacción dinámica del suelo y gracias a ello es que podemos utilizar las curvas de Reese y O'Neill, para poder estimar la capacidad que tendrá el pilote para desplazamientos pequeños.

A su vez Mark Svinkin, realizó una comparación de los resultados de los ensayos dinámicos y estáticos para distintos niveles de energía y se demostró gráficamente que para niveles de energía muy bajo la dispersión de los resultados fue mucho menor. Los resultados de ambos ensayos tienen una variación apreciable de acuerdo al nivel de energía que se le suministra al pilote. Conforme aumentaba la energía los resultados fueron adoptando dispersiones cada vez más notables, esto demuestra que para niveles de energía muy bajos ambos ensayos tienen el mismo comportamiento y sus resultados son perfectamente comparables.

A continuación se muestra la gráfica desarrollada en dicha investigación donde se puede apreciar que a valores de energía menores a 1MN la nube de puntos esta menos dispersa que a energías mayores aplicadas.

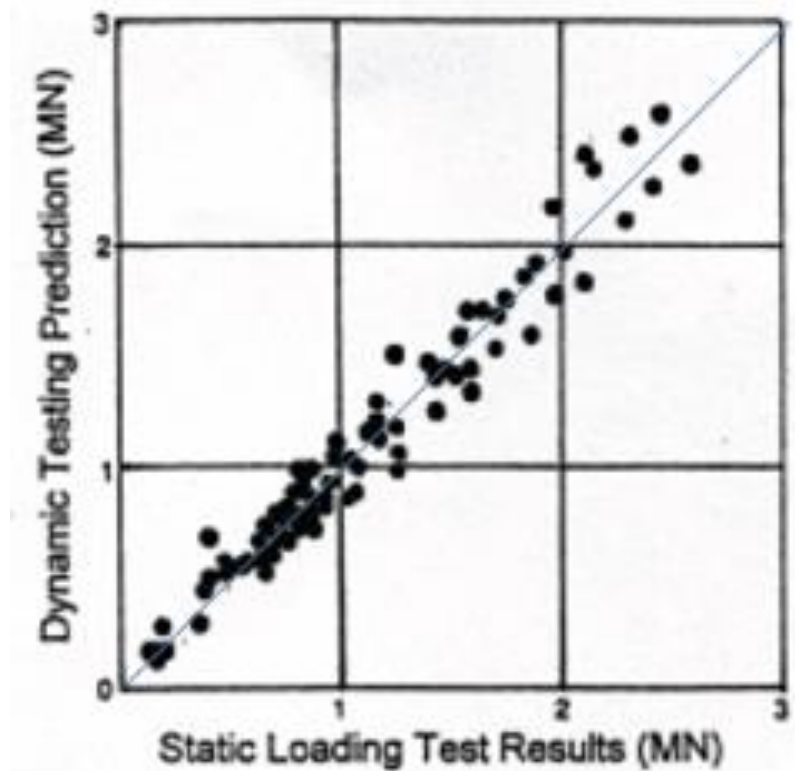


Figura 22. Representación gráfica de mediciones de fuerza para ensayos dinámicos y estáticos.

Fuente: "Typical Dinamic and Static Test capacity correlation", Svinkin, (2000).

A continuación, se muestran dos ensayos realizados con data de campo, obtenidos del ingeniero investigador Heriberto Echezuria. El primero vinculado a graficas obtenidas de la realización de un ensayo estático, dondelos gráficos incluidos en la misma son para arenas y un segundo ensayo, vinculado a una tabla de resultados obtenidos de pruebas de carga dinámica.

- Ensayo Estático para un pilote de 900 mm de diámetro.

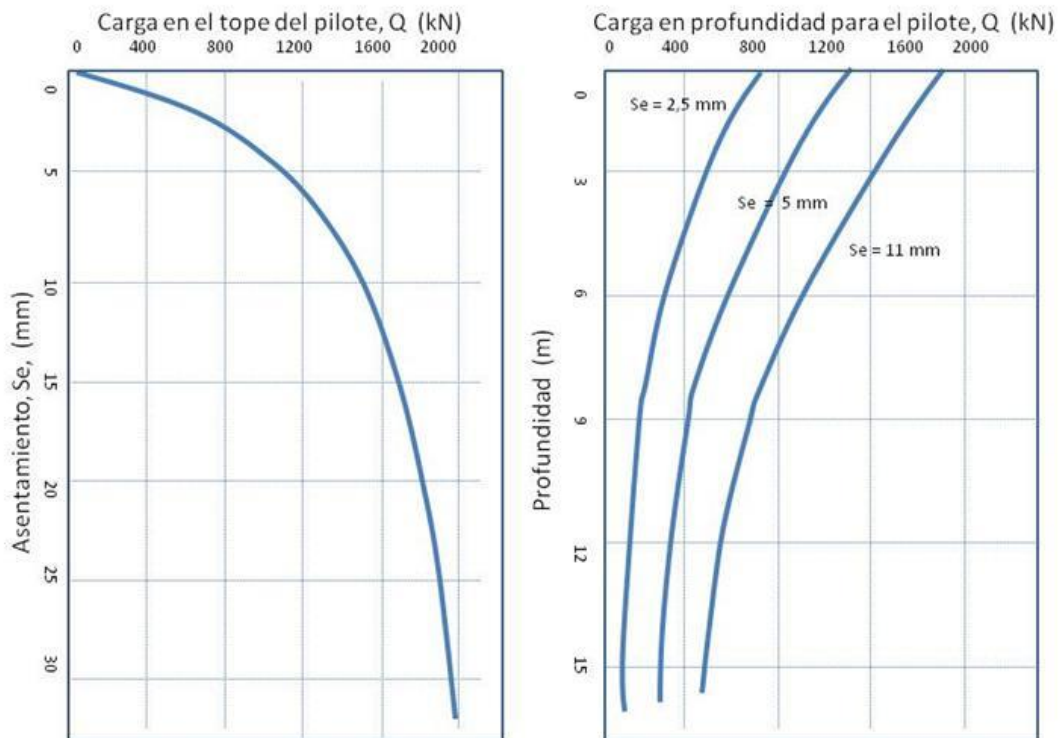


Figura 23. Esquemático de resultado de prueba de carga estática con mediciones de a) carga-asentamiento y b) cargas de fricción y punta a distintas profundidades de un pilote de 90 cm de diámetro en arena para distintos desplazamientos del mismo.

Fuente: Apuntes de Ing. Heriberto Echezuria, Pruebas estáticas y dinámicas en pilotes.

Como se puede notar la figura 23 a. se obtuvo de la realización de una prueba de carga estática donde el pilote fue cargado desde el tope y al estar bajo la acción de esta carga se produjeron asentamientos del elemento.

La figura 23 b. se muestra la longitud total del pilote y las cargas medidas con celdas colocadas a distintas profundidades en el mismo, tanto de fricción como de punta. Obsérvese que la figura 23a. se indica los desplazamientos a los cuales se midieron las cargas representadas en la Fig. 23 b).

El pilote ensayado tiene un diámetro de 900 mm y según lo establecido por los investigadores Reese y O'Neill la capacidad por fricción debe desarrollarse completamente para una relación asentamiento-diámetro del 4%. Eso indica que para el pilote ensayado desarrolle toda su capacidad por fricción, debe asentarse 3.6 mm.

Se puede observar que para un asentamiento de 2,5 mm del pilote de 900 mm, se obtiene una carga de cerca de 800 kN en el tope del pilote. Para ese nivel de desplazamiento las cargas medidas por la celda en la punta del pilote alcanzan unos 100 kN, es decir, la carga desde el tope hasta la punta ha disminuido significativamente. La diferencia entre la carga registrada en el tope y la registrada en la punta, arroja que la capacidad por fricción asociada a este asentamiento es de 700 kN y según lo contemplado anteriormente, para este asentamiento aun la capacidad por fricción no se ha desarrollado completamente.

Para los otros dos asentamientos (5 mm y 11 mm) se contempla exactamente lo mismo, la única diferencia es que para estos niveles de desplazamiento la fricción ya se habrá desarrollado completamente, por haber sobrepasado los 3,6 mm de desplazamiento del pilote. Si examinamos lo ocurrido a un asentamiento de 11 mm tenemos que la carga en el tope es de unos 1600 kN mientras que en la punta la celda registra solamente unos 500 kN. Esto nos indica que la resistencia total de fricción sería de unos 900kN.

- **Ensayo dinámico para pilote de 900 mm y 700 mm de diámetro.**

Observando los valores de desplazamiento obtenidos en el pilote de 900 mm de diámetro de la Tabla 1, después de haber realizado la prueba de carga dinámica, golpeando el pilote con el martillo, se observa que dicho pilote se asentó 2 mm.

Identificación del Pilote	Asentamiento Permanente	Dímetro del Pilote	Energía Transferida Promedio	Esfuerzo Máximo a Compresión	Tensión Máxima	Capacidad CAPWAP
	mm	cm	(1) ton-m	(2) MPa	(3) MPa	(4) ton
Pilote A32	2.0	90	1.8	11	1	490
Pilote B8	1.5	70	2	13	1	305

Notas:

1. Energía Máxima Transferida
2. Máximo esfuerzo a compresión calculado por CAPWAP
3. Máximo Esfuerzo a tensión calculado por CAPWAP
4. Capacidad CAPWAP

Tabla 1. Resumen de resultados de una prueba dinámica en pilotes de 90 y 70 cm de diámetro.

Fuente: Apuntes de Ingeniero Heriberto Echezuria, Pruebas estáticas y dinámicas en pilotes.

Si comparamos ambos ensayos e identificamos la carga que genera un desplazamiento de 2 mm en la curva proveniente del ensayo estático 18 a. vemos que está alrededor de los 500 kN, muy cercana a la determinada en la prueba con otro método que utiliza un procedimiento dinámico, la cual fue de 490 kN, según se indica en la Tabla 1.

De la comparación de los resultados de ambos ensayos, queremos recalcar que en los ensayos dinámicos mientras los desplazamientos sean pequeños (lo que está directamente relacionado con la baja energía que se le induce al sistema) podemos tener resultados bastante cercanos a los arrojados por ensayos estáticos.

Si se elaboran las curvas de capacidad- asentamiento esperados a partir de las curvas de los investigadores Reese y O'Neill, podemos estimar la carga que debe tener el pilote, la cual será muy cercana a la obtenida con otros procedimientos dinámicos más sofisticados.

2.3.9 Consideraciones del ensayo dinámico de baja energía. Diferencia entre el ensayo dinámico de baja energía y el de alta energía.

Cuando se realiza el ensayo de baja energía, es necesario destacar que existen dos (2) velocidades, una velocidad es la del frente de ondas y otra velocidad asociada al movimiento de las partículas del pilote, que está relacionada con la frecuencia con la que se expande y contrae las mismas y a su vez está relacionada con la amplitud de la onda. También, la onda que se produce por el golpe es la que genera las fuerzas internas y la reacción dinámica que tendrá el suelo. Entonces, los conceptos que aplican en las ecuaciones dinámicas, son los siguientes:

$$m \ddot{X} + C\dot{X} + kX = Fdt$$

Siendo $m \ddot{X}$ la fuerza de newton, kX la fuerza debida a la compresión y $C\dot{X}$ la reacción por amortiguamiento del suelo. La fuerza de amortiguamiento aumenta a medida aumenta la velocidad de la masa y la del resorte a medida que el desplazamiento de la misma aumenta.

Si se golpea con baja energía al pilote, se forman ondas que tienen poca amplitud. Si se induce un golpe más fuerte, se van a generar probablemente, tanto ondas con gran amplitud como ondas con poca amplitud, pero las que van a dominar serán las grandes, debido a que se le está proporcionando mucha energía. Nótese que la reacción del resorte del suelo aumenta al aumentar el desplazamiento. De la misma manera, la velocidad de la masa de suelo en la punta aumenta con la mayor amplitud del lazo de histéresis. Esto se muestra posteriormente en las figura 25.

Adicionalmente, hay parte de la energía que se pierde por radiación en la punta del pilote por impedancia. Este efecto hace que las siguientes ondas que viajan en el pilote tengan cada vez menos energía y deformen progresivamente al suelo. Eventualmente la fuerza sobre el suelo desaparece ya que la onda se disipa totalmente y con ella las componentes dinámicas antes mencionadas.

Si utilizamos una curva esfuerzo-deformación axial para evaluar los efectos en la disipación de energía en el suelo con la amplitud de las ondas, tenemos que cualquier ciclo de carga y descarga que invierta los esfuerzos en la misma magnitud

comienza y termina en la curva “columna vertebral” o “back bone” mostrada en la figura 24.

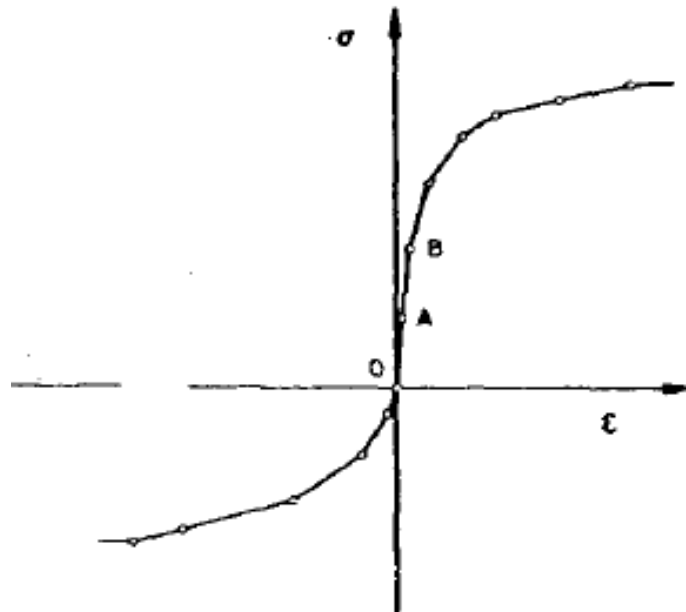


Figura 24. Curva Backbone.

Fuente: Respuesta dinámica de los suelos. E Alarcón. Universidad Politécnica, Madrid.

El elemento que excita es la onda de compresión que viaja por el pilote y llega al contacto con el suelo. Si observamos la figura 25, se observa lo que sucede en el suelo debajo de la punta del pilote para un ensayo dinámico con alta energía (derecha) y otro ensayo dinámico con muy baja energía (izquierda). Se nota que la energía liberada en el ensayo de baja energía es mucho menor que en el de alta energía y las velocidades de las partículas en el de alta energía serán mucho mayores que en el de baja energía, debido a la amplitud de los mismos.

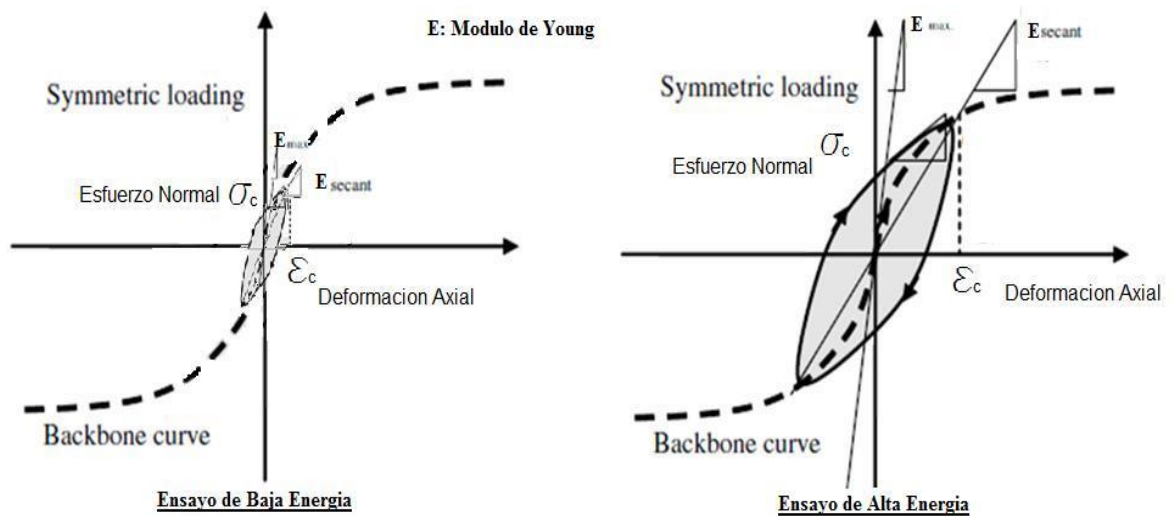


Figura 25. Lazos de histéresis para ensayos dinámicos de alta y baja energía.

Fuente: propia de los autores.

De acuerdo con Kramer, “Geotechnical Earthquake Engineering” Prentice-Hall international series 1996, establece que para un amortiguamiento viscoso, la fuerza de amortiguación es proporcional a la velocidad de la masa. Si la masa de suelo a desplazar debajo de la punta es pequeña, la velocidad también será pequeña, lo que genera que la fuerza de amortiguación sea baja, según lo establecido por el investigador mencionado.

Entonces se puede decir que para niveles de baja de energía, la componente dinámica se puede considerar despreciable frente a las de alta energía y frente a las otras componentes del equilibrio antes señaladas. De esta manera, la reacción total del suelo en ensayos de baja energía será solamente la reacción estática. Esto solo es posible debido a que tanto la energía que se induce como la energía que se disipa en este tipo de ensayos es muy baja, y esto está relacionado a bajos desplazamientos y velocidades de las partículas.

2.3.10 Reacciones y fuerzas a considerar en el ensayo dinámico de baja energía.

De acuerdo a lo antes mencionado, despreciando la reacción de la componente dinámica del suelo, nos queda que la fuerza total inducida en el pilote por el martillo, sería igual a la resistencia estática del suelo.

$$R_{ss} = F_{(t)}$$

Sabiendo que la resistencia estática del suelo es la sumatoria de la reacciones de fuste y punta del pilote, no se considera necesario el uso de las ecuaciones de ondas para el cálculo de la fuerza total inducida, ya que, se puede calcular solamente haciendo uso de ecuaciones estáticas.

$$Q_{punta} + Q_{fuste} = F_{(t)}$$

Con los conceptos contemplados en las ilustraciones anteriores, el cual fue explicado anteriormente y soportado con la ilustración 16 y utilizando las curvas de Reese y O'Neill se pueden realizar estimaciones bastante aproximadas de las capacidades de los pilotes a partir de los asentamientos permanentes del tope del elemento obtenidos de la prueba dinámica.

Se debe destacar que la capacidad debida al desplazamiento permanente del pilote es una fracción importante de la capacidad medida durante la prueba dinámica. La fracción de dicha capacidad para el asentamiento del pilote que tendrá durante la prueba podemos estimarla a partir de las curvas de Reese y O'Neill.

Teniendo en cuenta lo explicado anteriormente, se desarrollan los siguientes pasos para estimar las capacidades de fuste y punta en pilote mediante ensayos dinámicos de baja energía. Estos pasos se describen a continuación.

2.3.11 Procedimiento y consideraciones antes de la realización del ensayo dinámico de baja energía.

2.3.11.1 Calculo de las capacidades últimas de fuste y punta de pilotes.

Se calcula las capacidades últimas de fuste y punta en pilotes, utilizando las ecuaciones contempladas en la Norma API, las cuales son las siguientes:

Suelos Cohesivos

- **Fricción:**

$$f = \alpha * c_u$$

$$c_u = \frac{q_u}{2}$$

$$\alpha = 0.31 + 0.17 \left(\frac{10}{c_u} \right)$$

- **Punta:**

$$q = 9c_u$$

Suelos NO Cohesivos

- **Fricción:**

$$f = K * p_o * \text{Tg} \delta$$

K: Coeficiente de empuje lateral del suelo.

p_o : Presión de de sobrecarga

δ : Angulo de fricción suelo/pilote (Tabla 6-4-3-1 Norma API)

- **Punta:**

$$q = p_o * N_q$$

N_q : Tabla 6-4-3-1 Norma API

2.3.11.2 Asentamientos establecidos de acuerdo al diámetro del pilote, para la ejecución del ensayo.

Se fija el rango de porcentaje asentamiento-diámetro, de acuerdo con la condición de que para ensayos dinámicos de baja energía, los desplazamientos son bajos, por ende el fuste se desarrolla completamente y se considera que no se tomen porcentajes tan bajos para poder tener una buena apreciación de la lectura de las gráficas. Si observamos las gráficas de Reese y O'Neill para que el pilote logre desarrollar toda su capacidad por fuste se necesita una relación asentamiento-diámetro máxima del 0,4 % tanto en arenas como en arcillas.

Para los ensayos desarrollados por Nicolas Charue, los pilotes que fueron ensayados tenían 400mm de diámetro y como se puede observar en la figura 21, los resultados de las capacidades obtenidas de ambos ensayos (dinámico y estático) coinciden hasta asentamientos de 2mm, lo cual nos da una relación asentamiento-diámetro de 0,5%.

En base a eso, los autores de este TEG recomiendan que el rango de porcentaje de relación asentamiento-diámetro se encuentre alrededor del 0,20%, ya que como se puede observar en las curvas de Reese y O'Neill este porcentaje es concatenado a la capacidad admisible. Para ello se recomiendan los siguientes asentamientos, dependiendo del diámetro del pilote en estudio.

Diámetro(mm)	Asentamiento (mm)	A/D (%)
400	1	0.25
500	1	0.20
600	1.5	0.25
700	2	0.29
800	2	0.25
900	2	0.22
1000	2	0.20
1100	2.5	0.23
1200	2.5	0.21
1300	3	0.23
1400	3	0.21
1500	3	0.20

Tabla 2. Asentamientos recomendados de acuerdo al diámetro del pilote. Relación de estos mismos parámetros en %.

2.3.11.3 Estimación de las capacidades de carga teóricas de un pilote para el asentamiento establecido.

Con la relación asentamiento-diámetro ya fijada y las capacidades últimas tanto de fuste como de punta calculadas en el paso 1, se procede a estimar la fracción de las capacidades últimas de fuste y punta que se desarrollan para el asentamiento establecido, utilizando los gráficos de los investigadores Reese y O'Neill.

Para obtener esa fracción, se entra en las gráficas mencionadas con la relación asentamiento-diámetro, se intersecta con la curva promedio propuesta por los investigadores y se lee en el eje de las ordenadas el porcentaje del factor de disminución, tal como se muestra en la figura 26; la multiplicación de ese factor por la capacidad última, nos arroja la capacidad teórica que se estima que se estará desarrollando para el asentamiento establecido. Este procedimiento aplica tanto para

el fuste como para la punta y tanto en arena como en arcillas. Para la punta ese factor lo identificamos con la letra “A” y para el fuste con la letra “B”.

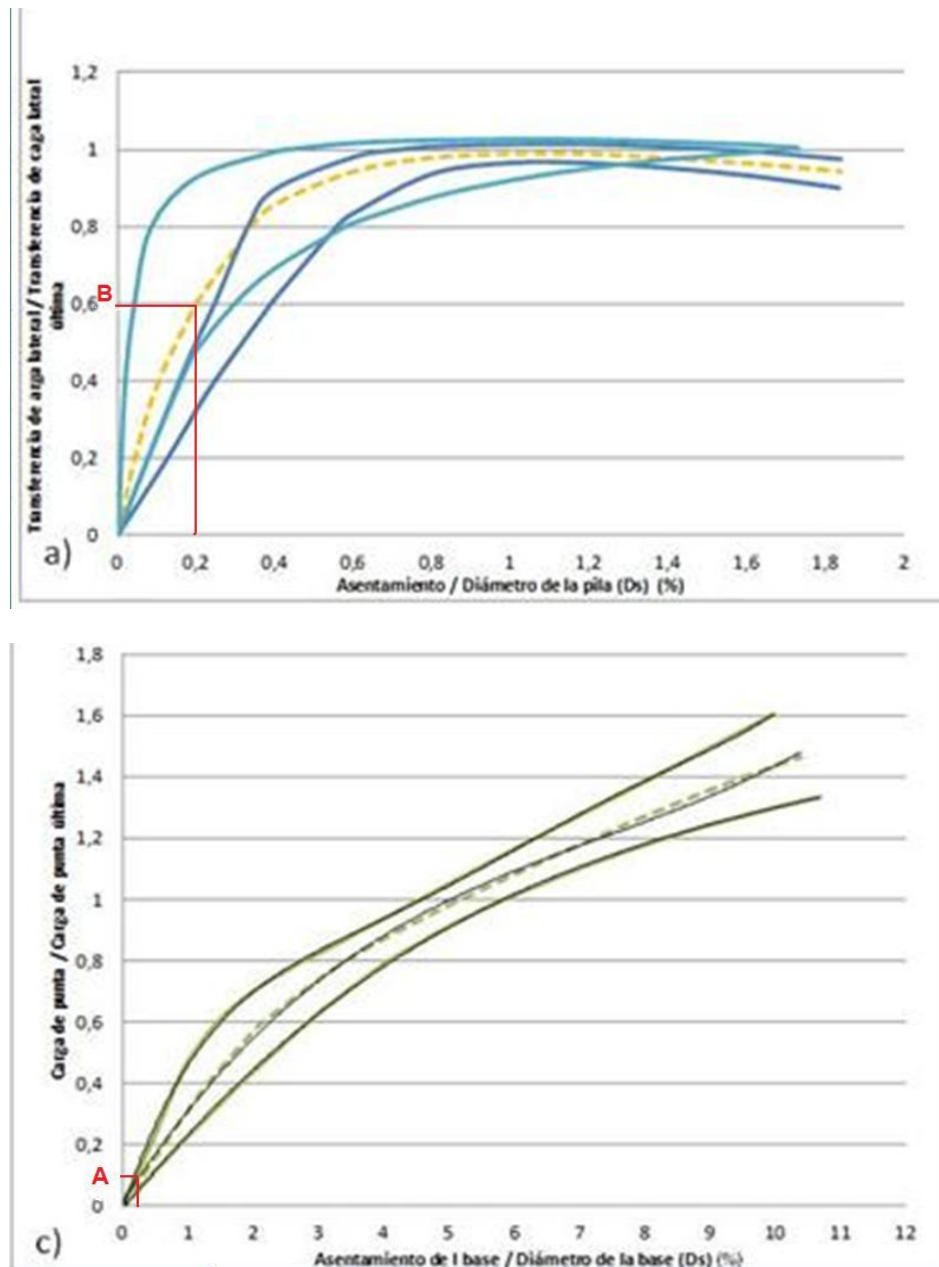


Figura 26. Explicación gráfica para la obtención de los factores A y B en las curvas de Reese y O'Neill, para suelos arenosos

Fuente: propia de los autores.

La suma de estas fracciones nos arroja la capacidad total teórica que tendrá el pilote para este asentamiento.

$$Q_{Total\ teorica} = A (Q_{ult\ punta}) + B (Q_{ult\ fuste})$$

2.3.11.4 Altura del martillo, para la realización del ensayo, sin considerar las pérdidas que se generan en el golpe.

Analizando la onda generada en el pilote debido al golpe del martillo, sabemos que las repetidas incursiones de la onda en el martillo son las que producen la fuerza dentro del pilote que causa que el elemento estructural se asiente, es decir, causa la rotura del suelo. Para esas condiciones tenemos que por cantidad de movimiento y energía potencial, se origina la siguiente ecuación:

$$F_{(t)} * t = \frac{m_{martillo}}{g} * V_{martillo}$$

- $F_{(t)}$ es la fuerza total dentro del pilote
- t es el tiempo de viaje de la onda dentro del pilote (resulta en milésimas de segundo). Este es la relación de 2 veces la longitud del pilote entre la velocidad de transmisión de la onda en el material del pilote, representada con la letra “C”. Para concreto $C=4000$ m/seg.

$$t = \frac{2L}{C}$$

- m es la masa del martillo
- g es la gravedad = $9,81$ m/seg²
- V es la velocidad de caída del martillo

La capacidad total teórica obtenida en el punto anterior, será la fuerza con la que se debe golpear el pilote, asumiendo que en el impacto no se generan pérdidas.

$$F_{(t)} = Q_{Total}$$

Despejando la velocidad del martillo de la ecuación anterior, nos queda:

$$V_{martillo} = \frac{F_{(t)} * \left(\frac{2L}{C}\right) * g}{m_{martillo}} \quad Ec\ (1)$$

Esa velocidad, es la velocidad con la que el martillo impacta al pilote. Utilizando las ecuaciones de caída libre, tenemos que:

$$V_f = V_o + g t \quad Ec (2)$$

$$h_{martillo} = V_o * t + \frac{1}{2} * g * t^2 \quad Ec (3)$$

Siendo:

- $h_{martillo}$ = altura del martillo.
- $V_f = V_{martillo}$
- $V_o = 0$ (martillo en reposo)
- t = tiempo que tarda el martillo en dar el impacto.

Despejando el tiempo que tarda el martillo en dar el impacto, de la ecuación (2), tenemos:

$$t = \frac{V_{martillo}}{g} \quad Ec (4)$$

Con ese tiempo podemos calcular la altura que tendrá el martillo, sustituyendo ese resultado en la ecuación (3). Si suponemos que no hay pérdidas (caso no real), esa altura del martillo con la que voy a dar el golpe para desarrollar el ensayo, va a generar una fuerza igual a la estimada en el punto anterior; pero esto es una condición ideal. En la realidad cuando ejecuto el ensayo se generan ciertas pérdidas que deben considerarse, ya que en campo, cuando se realiza el ensayo, si el golpe se da con la altura tal como se contempla en el desarrollo de este punto, la fuerza que será transmitida en la cabeza del pilote será menor a la capacidad total teórica obtenida en el punto anterior.

2.3.11.5 Pérdidas que se producen en el desarrollo del ensayo dinámico de baja energía.

En el siguiente TEG se obtuvo información acerca de la eficiencia del golpe, gracias al trabajo de investigación de Nicolas Charue titulado “Loading rate effects on pile load displacement behavior derived from back-analysis of two load testing procedure” (2004), en la que realizó ensayos de baja energía y estimo gráficamente la eficiencia del golpe de un martillo Vulcan.

Para la estimación de esta eficiencia realizó una relación de la energía de entrada en el pilote y la energía potencial que posee martillo. A diferentes alturas del martillo y midiendo la energía real en el pilote, represento estos valores y obtuvo una gráfica con tendencia lineal. La pendiente de dicha recta es la eficiencia que tiene el golpe del martillo, esta tuvo un valor de 48%.

En la siguiente figura se observa el resultado final de la relación.

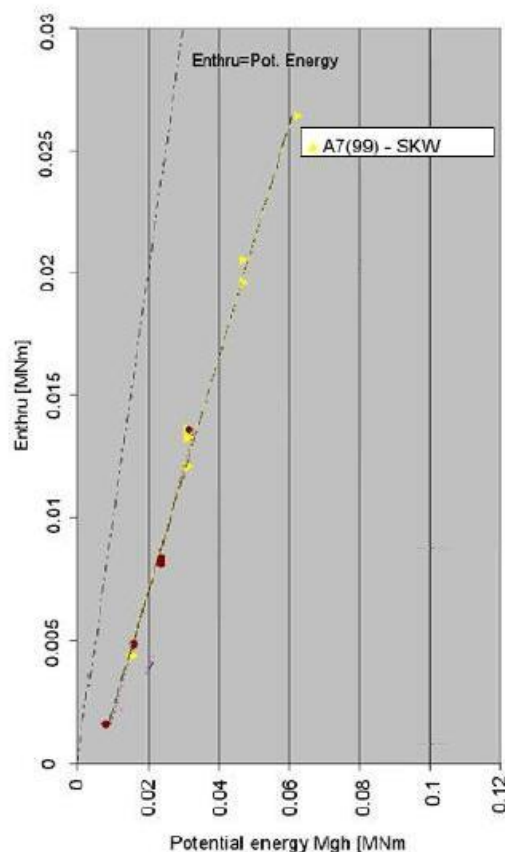


Figura 27. Representación gráfica de la relación de la energía de entrada en el pilote y la energía potencial que posee martillo a diferentes alturas.

Fuente: Loading rate effects on pile load displacement behavior derived from back-analysis of two load testing procedure”. Nicolas Charue (2004).

Por otro lado Frank Rausche (2009) realizó una investigación titulada “Quality Management by Means of Load Testing and Integrity Testing Of Deep Foundations” en la cual realizando ensayos de hincado de pilote, se determinó la eficiencia del golpe con distintos tipo de sistema de impacto en el que concluyó por

medio de ensayos experimentales, valores de eficiencia del golpe en martillos de acción simple por impulsión a vapor, y martillos de caída libre. Los valores encontrados fueron los siguientes:

- Martillos de acción simple por impulsión a vapor, 67%
- Martillos de caída libre, 67%

Con esta data encontrada, se realizó un promedio para obtener un valor representativo que contenga la experiencia de ambos investigadores, razón por la cual se fijó un valor de eficiencia del 60%, lo que quiere decir que las pérdidas generadas por el impacto del martillo se encuentran alrededor del 40%.

Cabe destacar que las pérdidas de energía en el golpe vienen dadas por la eficiencia del martillo y la disipación de energía en el suelo al momento del impacto.

De acuerdo a las notas de clase realizado por el ingeniero Heriberto Echezuria titulado “Pruebas de carga estáticas y dinámicas en pilotes”, en el cual midieron cual era la disipación de la energía en el suelo que fue originalmente transferida por pilote y observaron la fracción de dicha perdida de energía del impacto del martillo que es absorbida por el suelo. Para definir este aparte haremos uso de la tabla de impedancia pilote/suelo desarrollada por ellos mismo.

Relación de impedancia α_z	Amplitudes del desplazamiento			Amplitudes de esfuerzos			Cometnario	Vp (m/s) Velocidad de onda de compresión en el suelo asumiendo que γ no varía significativamente
	Incidente	Reflejada	Transmitida	Incidente	Reflejada	Transmitida		
0	A_i	A_i	$2A_i$	σ_i	$-\sigma_i$	0	Suelo muy poco competente	$<<100$
1/25	A_i	$0,92A_i$	$1,92A_i$	σ_i	$-0,92\sigma_i$	$0,08\sigma_i$	Suelo algo competente	160
1/15	A_i	$0,88A_i$	$1,88A_i$	σ_i	$-0,88\sigma_i$	$0,13\sigma_i$	Suelo medianamente competente	267
1/10	A_i	$0,82A_i$	$1,82A_i$	σ_i	$-0,82\sigma_i$	$0,18\sigma_i$	Suelo bastante competente	400
1/4	A_i	$0,60A_i$	$1,60A_i$	σ_i	$-0,60\sigma_i$	$0,40\sigma_i$	Roca blanda	1000
1/2	A_i	$0,33A_i$	$1,33A_i$	σ_i	$-0,33\sigma_i$	$0,67\sigma_i$	Roca algo meteorizada	2000
1	A_i	0	A_i	σ_i	0	σ_i	Roca sana	4000
2	A_i	$-0,33A_i$	$0,67A_i$	σ_i	$\sigma_i/3$	$1,33\sigma_i$	Roca cristalina	8000

Tabla 3. Influencia de la relación de impedancia en la amplitud de las ondas de desplazamiento y de esfuerzos, tanto reflejadas como transmitidas.

Fuente: “Pruebas de carga estáticas y dinámicas en pilotes” Apuntes del Ingeniero Heriberto Echezuria.

En la tabla 3, se puede observar el esfuerzo incidente ocasionado por el martillo, el esfuerzo que es reflejado en el pilote y el esfuerzo transmitido que se refiere al absorbido por el suelo en el momento del impacto. En este TEG se consideran suelos que se encuentren catalogados entre “suelo algo competente” y “suelo bastante competente” y como se puede observar en la tabla, para este tipo de suelos el esfuerzo transmitido se encuentra entre 8 y 18%. Para este rango se realizó un promedio y se puede decir que el esfuerzo que absorbe el suelo es de 13%.

Entonces, si las pérdidas ocasionadas por el impacto martillo como mencionamos anteriormente es de 40% y a eso le sumamos lo que se pierde por la absorción de la onda por el suelo, nos da un total de pérdidas en el sistema martillo-pilote-suelo del 53%. Este valor podemos redondearlo a 55% para acercarnos a un valor más trabajable.

Cabe destacar que para la realización del ensayo se deben tomar en cuenta las pérdidas en el sistema martillo-pilote-suelo, de tal manera de corregir la altura de

caída del martillo con la cual se realizara el golpe. Esta altura está vinculada a una nueva fuerza que posteriormente se hará referencia en el cálculo de la misma.

Capítulo III. MARCO METODOLOGICO

3.1 Tipo de investigación.

En cuanto al tipo de investigación se puede decir que es descriptivo. El nivel descriptivo abarca una secuencia de pasos como: “la descripción, registro y análisis de documentación actual, y la composición o procesos de los fenómenos.” (Tamayo, 1999. “Proceso de la investigación científica” pag.54) que facilitan la comprensión de la información recogida.

En este trabajo no se realizan estudios experimentales ni exploratorios, simplemente se desarrolla a partir de una amplia investigación bibliográfica confiable, de ensayos ya realizados, que tienen vinculada información relevante, de tal manera de procesar dicha información y utilizarla en el área profesional.

3.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es un plan global de investigación que integra de un modo coherente y adecuadamente correcto técnicas de recogida de datos a utilizar, análisis previstos y objetivos.

La presente investigación asume un diseño no experimental, la cual fue conceptualizada por Kerlinger, (2009), “Metodología de la investigación en ciencias sociales” como: “cualquier investigación en la cual resulta imposible manipular variables o asignar aleatoriamente a los sujetos o las condiciones”.

En una investigación no experimental no se construye ninguna situación sino que se observan las ya existentes sin que sean provocadas por el investigador.

3.3 Descripción de la metodología

- **Recolección bibliográfica:** se realizó una amplia recolección de información relevante relacionada en ensayos dinámicos y estáticos.
- **Revisión de la información:** se logró observar que habían componentes dinámicos, en el ensayo de baja energía que se pueden despreciar. Debido a esto se realizaron comparaciones entre el ensayo dinámico de baja energía con el ensayo estático y se establecieron las diferencias entre un ensayo dinámico de alta energía con un ensayo dinámico de baja energía.

- Se estiman las capacidades de punta y fricción mediante ensayos dinámicos de baja energía: se deben realizar los siguientes pasos.
 - Cálculo teórico de las capacidades últimas de fuste y fricción: se calcularon estas capacidades en el pilote de prueba, mediante las ecuaciones contempladas en la Norma “American Petroleum Institute (API)”.
 - Gráficas de Reese y O’Neill: se utilizaron las gráficas de Reese y O’Neill, fijando un asentamiento bajo, para considerar que el ensayo dinámico sea de baja energía y poder despreciar la componente dinámica; se entra en las gráficas y se observa cual es la capacidad promedio tanto en el fuste como en la punta del pilote que se desarrollan para este asentamiento establecido.
 - Altura del martillo: por medio de cantidad de movimiento, se calcula la altura que deberá tener el martillo para la ejecución del ensayo, considerando las capacidades obtenidas en el punto anterior y las pérdidas generadas en el golpe.
 - Se establece un procedimiento para ejecutar el ensayo cuando no se cuenta con celdas medidoras de fuerzas, con la finalidad de obtener la capacidad total del pilote para el asentamiento establecido. Dependiendo del resultado que se obtenga se procede a realizar ajustes en la capacidad de fricción y punta. De esa manera se determina la capacidad que tendrá el elemento para el asentamiento fijado.
- Se identificaron las variables que influyen en que un pilote desarrolle su capacidad.
- Se realizó un modelo estadístico para establecer cual variable tiene mayor influencia en el desarrollo de la capacidad de un pilote.
- Se realizaron las curvas máximas, mínima y promedio de Reese y O’Neill para un pilote en particular. Se generaron ciertas suposiciones de los resultados que puede arrojar el ensayo dinámico de baja energía, para poder

estimar la probabilidad de que un pilote logre desarrollar su capacidad para asentamientos aceptables.

Capítulo IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Estimación de las capacidades de fuste y punta, mediante resultados obtenidos de pruebas dinámicas de baja energía.

Como se ha mencionado anteriormente las pruebas de carga dinámicas son realizadas e interpretadas por empresas especializadas que solo proporcionan la capacidad total del pilote. De acuerdo con los resultados de las investigaciones antes mencionadas, en el marco teórico, donde se pudo demostrar que los resultados obtenidos por medio de ensayos dinámicos de baja energía coinciden bastante bien con ensayos estáticos, se puede estimar cuanto de esa capacidad total que proporciona la empresa, corresponde al fuste y a la punta, haciendo uso de las curvas de Reese y O'Neill.

Para ello se necesita conocer el asentamiento al cual se desarrolló la prueba de carga dinámica de baja energía, con la finalidad de conocer cuánto es la relación asentamiento-diámetro, para así, haciendo uso de las gráficas de Reese y O'Neill obtener tanto la capacidad de fuste como la capacidad de punta.

De acuerdo al ejemplo contemplado en el capítulo II, donde se obtienen resultados obtenidos de ensayos estáticos y dinámicos, se puede observar que para la prueba dinámica de baja energía, el valor medido por la celda para el asentamiento de 2 mm fue de 490 kN para el pilote de 900 mm de diámetro.

Luego se procede a estimar las resistencias de punta y de fricción utilizando los gráficos de la Figura 12. Esas estimaciones indican que al ser la capacidad total de 490 kN la resistencia de fricción estaría en el orden de los 380 kN y la de punta en los 110 kN. A continuación se presenta una tabla con el resumen de estas capacidades:

Identificación del Pilote	Asentamiento Permanente	Diametro del Pilote	Energía Transferida Promedio	Esfuerzo Maximo a Compresion	Tension Maxima	Capacidad CAPWAP	Capacidad Punta Fuste (ton)	
	mm	cm	(1) ton-m	(2) MPa	(3) MPa	(4) ton		
Pilote A3	2,0	90	1.8	11	1	490	110	380
Pilote C62	1,5	70	2,0	13	1	305	75	230

Notas:

1. Energía Maxima Transferida
2. Maximo esfuerzo a compresion calculado por CAPWAP
3. Maximo Esfuerzo a tension calculado por CAPWAP
4. Capacidad CAPWAP

Tabla 4. Resumen de resultados de una prueba dinámica en pilotes de 90 y 70 cm.

Fuente: Apuntes de Ing. Heriberto Echezuria, Pruebas estáticas y dinámicas en pilotes.

Como se puede observar, los resultados que se obtuvieron de las gráficas de Reese y O'Neill son acertados a los correspondientes con la capacidad arrojada por el CAPWAP. Esto nos indica que este método es bastante preciso y acertado para estimar las capacidades tanto de fuste como de punta del pilote

4.2 Estimación de las capacidades de fuste y punta de pilotes, cuando no se cuenta con celdas medidoras de fuerza. Método alternativo para la ejecución del ensayo.

El ensayo dinámico de baja energía se va a realizar golpeando al pilote hasta llegar al asentamiento establecido, para que el ensayo se mantenga en el rango estático, tal como se describe en capítulos anteriores. A su vez el pilote se debe encontrar a la cota de desplante, razón por la cual también se requiere que los asentamientos producidos por el golpe sean bajos.

Considerando las pérdidas que se generan en el sistema martillo-pilote-suelo, se sabe que la fuerza que le va a entregar el martillo al pilote, será menor a la capacidad total teórica. Si la fuerza es menor, el asentamiento que tendrá el elemento será menor al fijado.

En campo generalmente se cuenta con medidores de desplazamiento mas no se cuenta con celdas medidoras de fuerzas y si se sabe que la fuerza que le entregará el martillo al pilote será menor a la capacidad total estimada debido a las pérdidas que se generan, se recomienda que para ejecutar el ensayo dinámico de baja energía se den varios golpes, de tal manera de disminuir aún más la fuerza real que va a recibir el pilote con la finalidad de no correr el riesgo de exceder el asentamiento fijado.

Los autores de este TEG, recomiendan fijar la fuerza real que se desarrolla en la cabeza del pilote de tal manera que esta sea igual a un 20 o 25% de la capacidad total teórica que se obtiene por medio de las ecuaciones contempladas en la Norma API RP 2 A. y haciendo uso de las curvas de Reese y O'Neill, para así asegurar que se realicen más golpes y tener mayor control de los desplazamientos. Estos porcentajes están directamente relacionados con el número de golpes realizados, asumiendo que el porcentaje que se tome son los golpes que debemos inducirle al pilote para que este se asiente los milímetros establecidos en el capítulo II, es decir, si se toma el 20% se estaría asumiendo que se necesitan 5 golpes para que el pilote se asiente los milímetros establecidos mientras que si se toma el 25% el número de golpes correspondería a 4.

Fijada la carga real en la cabeza del pilote, se debe estimar la altura que tendrá el martillo para que se pueda generar esa fuerza en la cabeza del elemento. Para ello debemos incrementar la fuerza real que sentirá el pilote considerando las pérdidas que se producen en el sistema compuesto por el sistema martillo-pilote-suelo, dividiendo la misma entre la eficiencia y esa será la nueva fuerza teórica que deberá tener el martillo antes de realizar el impacto. Entonces la fuerza teórica es:

$$F_{teorica\ 2} = \frac{F_{real}}{e}$$

Siendo

- e la eficiencia del sistema igual a:

$$e = 1 - perdidas = 1 - 0.55 = 0.45$$

- F real, la fuerza que se desarrolla en la cabeza del pilote.

- $F_{teórica 2}$ es la fuerza del martillo que no ha sido afectada por las pérdidas.

Teniendo la nueva fuerza teórica, se recalcula la altura del martillo tal como se describe en el capítulo II.

Ya con la altura recalculada se deja caer el martillo y se debe llevar un control del número de golpes y del desplazamiento que genera cada uno de ellos. Se debe parar el ensayo cuando este asentamiento se encuentre bastante cercano al establecido anteriormente.

La capacidad total del pilote será igual a la sumatoria de todas las fuerzas entregadas en cada golpe, asumiendo que en cada uno de ellos la fuerza entregada al pilote es la misma, debido a que cada golpe se realiza con la misma altura.

4.3 Casos que se pueden presentar una vez realizado el ensayo.

Una vez realizado el ensayo hasta llegar al asentamiento establecido o muy cercano a él, se pueden presentar los siguientes casos:

1. La sumatoria de las fuerzas de cada golpe es igual a la capacidad total del pilote estimada. Esto quiere decir que el número de golpes que se indujo hasta lograr ese asentamiento es el que se había predicho y por ende las capacidades de fuste y punta obtenidas de las gráficas de Reese y O'Neill son acertadas.
2. La sumatoria de las fuerzas de cada golpe es menor a la capacidad total del pilote estimada: esto quiere decir que se dieron menos golpes de los estimados para lograr ese asentamiento, por lo tanto la capacidad desarrollada en el pilote es menor a la capacidad total que se estimó en el punto mencionado. Si esto es así, las capacidades de punta y fuste deben corregirse, variando los factores A y B y para ello se utilizan las gráficas de Reese y O'Neill, tomando valores que se encuentren por debajo de los establecidos en un principio, hasta que se cumpla la igual de la ecuación.

$$Q_{Total\ obtenida} = A(Q_{ult\ punta}) + B(Q_{ult\ fuste})$$

3. La sumatoria de las fuerzas de cada golpe es mayor a la capacidad total del pilote estimada: esto quiere decir que se dieron más golpes de los estimados para lograr ese asentamiento, por lo tanto la capacidad desarrollada en el pilote es mayor a la capacidad total que se estimó en el punto mencionado. Si esto es así, las capacidades de punta y fuste deben corregirse, variando los factores A y B y para ello se utilizan las gráficas de Reese y O'Neill, tomando valores que se encuentren por encima de los establecidos en un principio, hasta que se cumpla la igual de la ecuación.

$$Q_{Total\ obtenida} = A(Q_{ult\ punta}) + B(Q_{ult\ fuste})$$

4.4 Identificación de las variables que afectan el desarrollo de la capacidad de un pilote.

Basándose en literatura consultada y en la experiencia de profesionales en el área de fundaciones profundas, se identificaron las variables que afectan el desarrollo de la capacidad de un pilote. Estas variables son las siguientes:

- Presencia de lodo bentonítico en las paredes de la perforación en el momento del vaciado: este error constructivo puede presentarse en pilotes excavados en los que se realizó un mal diseño del lodo, y este resulta con una densidad superior al recomendado, lo que ocasiona un incorrecto desplazamiento del material al momento del vaciado del concreto, por tal razón, las paredes de la perforación quedan cubiertas por una película de lodo que ocasionan que al momento de estar culminado el pilote, no se genere la adherencia suficiente en la interface suelo/pilote, y por tanto no se la capacidad por fuste no será la esperada luego de estar construido.
- Residuos de material arenoso en el fondo de la perforación: Ocasionado por el mal lavado del pozo al finalizar la excavación que produce un efecto “colchón” en la punta del pilote, lo que abre paso a imperfecciones en la misma y puede ocasionar mayores asentamientos del miembro.

- Integridad estructural: esta variable afecta a la probabilidad de que un pilote no llegue a su capacidad total de diseño. Entre más integro se encuentre el pilote menos problemas tendrá el mismo, es por ello que esta variable influye en el desarrollo de la capacidad de un pilote.

4.5 Realización de un árbol estadístico para establecer el nivel de influencia que tienen cada una de estas variables.

Una vez identificadas las variables se realizó un árbol estadístico para establecer cuál de ellas tienen mayor grado de afectación en el desarrollo de la capacidad de un pilote. Este modelo es un árbol de decisión o un proceso de Bernoulli, donde se contemplan las variables ya mencionadas asociadas a una probabilidad de ocurrencia.

Las distintas probabilidades de ocurrencia asociadas a cada variable se obtuvieron de la siguiente manera: la probabilidad de que un pilote quede integro estructuralmente se obtuvo del Trabajo Especial de Grado titulado “Propuesta para norma de aceptación y rechazo de lotes de pilotes” realizada por Quijada y Salvatorelli (2018), la cual establece que la probabilidad de que un pilote quede integro, cumpliendo con todos los parámetros constructivos con un Aseguramiento de Calidad (QA) intermedio es de 0.99636. Para las demás variables se consultó a profesionales especialistas en el área, y se obtuvo un rango de probabilidades de ocurrencia de cada una de ellas.

Para que el árbol de decisión tuviese validez, se encontró una investigación realizada por Klingmuller, Oswald and Kirsch, Fabian, “A quality and safety issue for cast in place piles with low strain integrity testing in Germany”, (1998) donde ensayaron pilotes durante 25 años y lograron obtener una probabilidad de 0.0066 de que un pilote no desarrolle su capacidad, aun cuando el nivel constructivo de un pilote sea óptimo.

Con el rango de valores de probabilidad obtenidos para las variables antes mencionadas y la probabilidad obtenida de la investigación de los alemanes, se procedió a realizar el árbol, variando las probabilidades obtenidas en la consulta hasta obtener una probabilidad final muy cercana a la de los alemanes.

Luego fijando los nuevos valores de probabilidades que coincidan con la probabilidad de falla arrojado por los alemanes se simuló una falla para cada variable y se obtuvo la probabilidad final de que el pilote desarrolle su capacidad fallando cada una de las variables, de esta manera se demostró la importancia del lavado de la punta ya que la probabilidad de alcanzar la capacidad arrojada al fallar este factor resulta menor que al fallar el lavado del pozo. La siguiente figura muestra las probabilidades de que un pilote alcance su capacidad cuando no cumple con alguna de las variables determinadas anteriormente..

PROBABILIDAD DE PILOTE QUE DESAROLLA CAPACIDAD ESTANDO INTEGRO	0.99636
PROBABILIDAD DE PILOTE QUE DESAROLLA CAPACIDAD NO ESTANDO INTEGRO	0.00364
PROBABILIDAD DE PILOTE QUE DESAROLLA CAPACIDAD LAVANDO POZO	0.93
PROBABILIDAD DE PILOTE QUE DESAROLLA CAPACIDAD NO LAVANDO POZO	0.07
PROBABILIDAD DE PILOTE QUE DESAROLLA CAPACIDAD LAVANDO PUNTA	0.92
PROBABILIDAD DE PILOTE QUE DESAROLLA CAPACIDAD NO LAVANDO PUNTA	0.08

Tabla 5. Probabilidad de tener un pilote bueno o malo para alcanzar la capacidad de carga ya ajustada.

Fuente: Propia de los autores.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de cada ruta que se generó con el modelo.

Hay 4 preguntas, podemos dividir el escenario considerando:		# casos	Probabilidad
0 malas	Pilote que alcanza su capacidad holgadamente	1	0,85248562
1 mala	Pilote que desarrolla su capacidad sin problema	3	0,14140915
2 malas	Pilote que alcanza su capacidad muy justo	3	0,00608485
3 malas	Pilote que no alcanza la capacidad necesaria	1	0,00002038
Son 8 estados posibles			1

Tabla 6. Resultado de aplicación del árbol de decisión para cada una de las rutas.

Fuente: Propia de los autores.

El procedimiento de análisis que arrojo estos resultados forman parte de los anexos de este TEG.

Luego de aplicar el árbol de decisión y determinando las rutas que conducen a que el pilote desarrolle o no su capacidad, mostrada en la tabla 6, tomando cada una de las probabilidades de las variables mencionadas, se determina que la probabilidad de obtener un pilote que alcance su capacidad y otro que no alcance su capacidad es prácticamente igual al valor obtenido del trabajo de los alemanes, por lo que podemos asegurar que la calibración fue correcta.

La siguiente tabla reseña lo comentado anteriormente.

PROB PILOTE QUE NO DESARROLLA CAPACIDAD ALEMANIA	0.006667
PROB PILOTE QUE NO DESARROLLA CAPACIDAD ESTE ARBOL	0.00611
PROB PILOTE QUE DESARROLLA CAPACIDAD ESTE ARBOL	0.994

Tabla 7. Probabilidad de que un pilote desarrolle o no desarrolle su capacidad de carga, arrojada del árbol de decisión.

Fuente: Propia de los autores.

Una vez que se calibra el árbol, se hace un análisis de sensibilidad, con la finalidad de obtener cual es la variable más influyente en que un pilote desarrolle o no su capacidad de carga. Es por ello que ahora se presenta la Probabilidad de pilote desarrolle o no desarrolle su capacidad de carga según las fallas generadas, tanto de integridad, como de lavado del pozo, lavado de punta y combinación de las dos últimas.

CASO	PROB PILOTE DESARROLLA SU CAPACIDAD	PROB PILOTE NO DESARROLLA SU CAPACIDAD
PILOTE SIN DEFECTOS (INTEGRO Y LIMPIEZA GENERAL DE LA PERFORACION)	0,994	0,0061
DEFECTOS EN LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL	0,856	0,144
FALLA EN LA LIMPIEZA DE LA EXCAVACIÓN	0,922	0,078
FALLA EN LA LIMPIEZA DE LA PUNTA	0,932	0,068
FALLA EN LA LIMPIEZA GENERAL DE LA EXCAVACIÓN (PUNTA Y FUSTE)	0,144	0,856

Tabla 8. Probabilidad de que un pilote desarrolle o no la capacidad portante según fallas.

Fuente: Propia de los autores.

Se puede observar que en el caso de que exista una falla de integridad estructural, la probabilidad de que el pilote desarrolle su capacidad se reduce de 99,4% a 85,6%, ya que esta es la variable de mayor importancia de las tres que se están estudiando. También se puede notar que cuando no se hace un correcto lavado del pozo la probabilidad se reduce a 92,2%, en el caso de un mal lavado en la punta la probabilidad se reduce a 93,2%. Para el caso drástico de un mal lavado en la punta y conjuntamente del pozo la probabilidad baja a 14,4%. Esto se debe a que al incurrir en ambos errores no se genera de manera correctas las dos únicas fuerzas que desarrolla el pilote, por lo tanto esta probabilidad tiene coherencia en que sea un valor apreciablemente menor a los nombrados anteriormente.

4.6 Estimación de la probabilidad de desarrollo de la capacidad de carga de un pilote, mediante un ensayo dinámico de baja energía.

Para estimar la probabilidad de desarrollo de la capacidad de un pilote, se realiza la curva teórica capacidad-asentamiento para el pilote que se quiera estudiar, utilizando las gráficas de los investigadores Reese y O'Neill, asignándole valores de diámetro y capacidad ultima tanto de fuste como de punta obtenidas teóricamente a las mismas, para luego obtener la gráfica de capacidad total, haciendo la sumatoria de las gráficas particularizadas. Eso nos arroja tres (3) curvas totales para un mismo pilote, la máxima, la promedio y la mínima.

Estas tres graficas nos arrojan un rango de capacidad para un mismo asentamiento. Los autores del presente TEG, dividen ese rango en subrangos para establecer las posibilidades que tiene un pilote en desarrollar su capacidad para los asentamientos aceptables que debe tener una fundación, tal como se muestra en la ilustración 28. Estos subrangos son los siguientes:

- Muy probable: rango delimitado por la curva máxima y la curva promedio. Quiere decir que los pilotes que se encuentren en este rango tienen una alta probabilidad de desarrollar su capacidad para asentamientos considerados aceptables.
- Probable: rango delimitado por la curva promedio y un 15% del rango total. Este 15% se estableció debido a la incertidumbre que genera este método para la aplicación del ensayo dinámico de baja energía razón por la cual se estableció este porcentaje por criterio de los autores. Este rango significa que es probable que el pilote desarrolle la capacidad para asentamientos aceptables.
- Poco probable: rango delimitado por el 15% del rango total mencionado anteriormente y la curva mínima, significa que es poco probable que el pilote desarrolle la capacidad admisible para asentamientos aceptables. El pilote si llega a desarrollar su capacidad pero para ello se requerirán desplazamientos verticales mucho

mayores a los considerados como aceptables. En este rango se encuentra la probabilidad de los alemanes

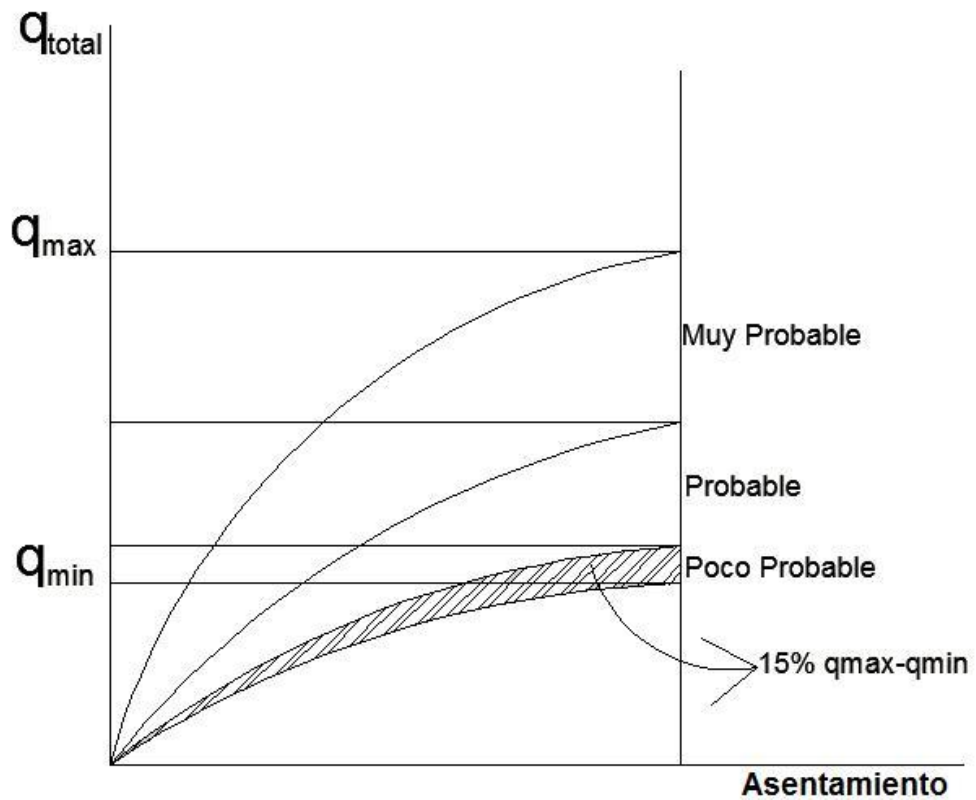
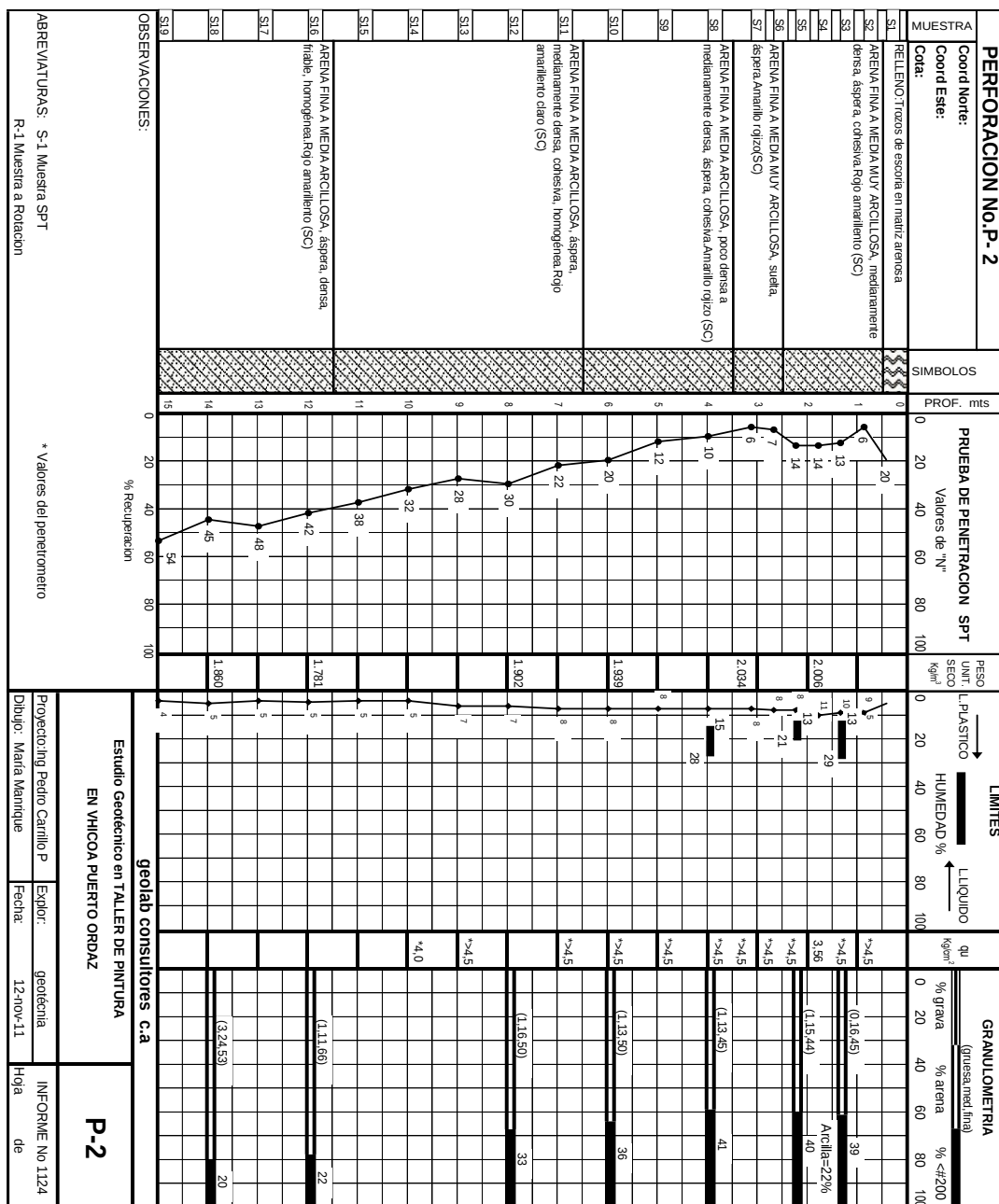


Figura 28. Representación de los rangos establecidos en las curvas de capacidad-Asentamiento de Reese y O'Neill para un pilote en particular

Fuente: propia de los autores.

Se procede a realizar el ensayo, tal como se describe en los puntos anteriores y se observa en que rango se ubica la capacidad que se desarrolla realmente el pilote en estudio para el asentamiento fijado, para así tener la probabilidad cualitativa de que el pilote desarrolle su capacidad.

4.7 Ejemplo práctico de la realización de un ensayo dinámico de baja energía, donde no se cuenta con celdas medidoras de fuerzas, partiendo de los datos de una perforación realizada por “Geolab Consultores” en un estrato que se puede considerar homogéneo de arena.



Asumiendo un suelo de densidad media buscamos los valores de Φ , ζ y N_q en la tabla siguiente.

Table 6.4.3-1—Design Parameters for Cohesionless Siliceous Soil*

Density	Soil Description	Soil-Pile Friction Angle, δ Degrees	Limiting Skin Friction Values kips/ft ² (kPa)	N_q	Limiting Unit End Bearing Values kips/ft ² (MPa)
Very Loose	Sand	15	1.0 (47.8)	8	40 (1.9)
Loose	Sand-Silt**				
Medium	Silt				
Loose	Sand	20	1.4 (67.0)	12	60 (2.9)
Medium	Sand-Silt**				
Dense	Silt				
Medium	Sand	25	1.7 (81.3)	20	100 (4.8)
Dense	Sand-Silt**				
Dense	Sand	30	2.0 (95.7)	40	200 (9.6)
Very Dense	Sand-Silt**				
Dense	Gravel	35	2.4 (114.8)	50	250 (12.0)
Very Dense	Sand				

Densidad equivalente en el estrato.

$$\rho_{seco} = \frac{2,006 * 2 + 2,034 * 2 + 1,939 * 2 + 1,902 * 2 + 1,781 * 4 + 1,860 * 3}{15} = 1,90 \text{ t/m}^3$$

$$w = \frac{10 + 8 + 8 + 8 + 8 + 8 + 8 + 7 + 7 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 + 4}{15} = 6,7\%$$

$$\rho_{hum} = \rho_{seco} * (1 + w)$$

$$\rho_{hum} = 1,90 * \left(1 + \frac{6,7}{100}\right) = 2,03 \text{ t/m}^3$$

Esfuerzo equivalente en el estrato.

$$\sigma_{veq} = 2,03 \text{ t/m}^3 * \frac{(1m + 15m)}{2} = 16,24 \text{ t/m}^2$$

Longitud Crítica (B =diámetro del pilote)

$$\frac{L_c}{B} = 10^{\frac{\Phi-7}{27}}$$

$$L_c = 10^{\frac{37,5-7}{27}} * 1m = 13,48 m$$

Capacidad de Punta

$$q_p = p_o * N_q$$

$$q_p = 2,03 t/m^3 * 13,48 m * 20 = 547,3 t/m^2$$

$$Q_{pult} = q_p * A$$

$$Q_{pult} = 547,3 t/m^2 * \left(\frac{\pi * (1m)^2}{4} \right) = 430 t$$

Capacidad de Fuste

$$f = K * p_o * tg\delta$$

$$K = 1 - sen\Phi = 1 - sen(37,5) = 0,39$$

$$p_o = 16,24 t/m^2$$

$$tg\delta = tg(20) = 0,36$$

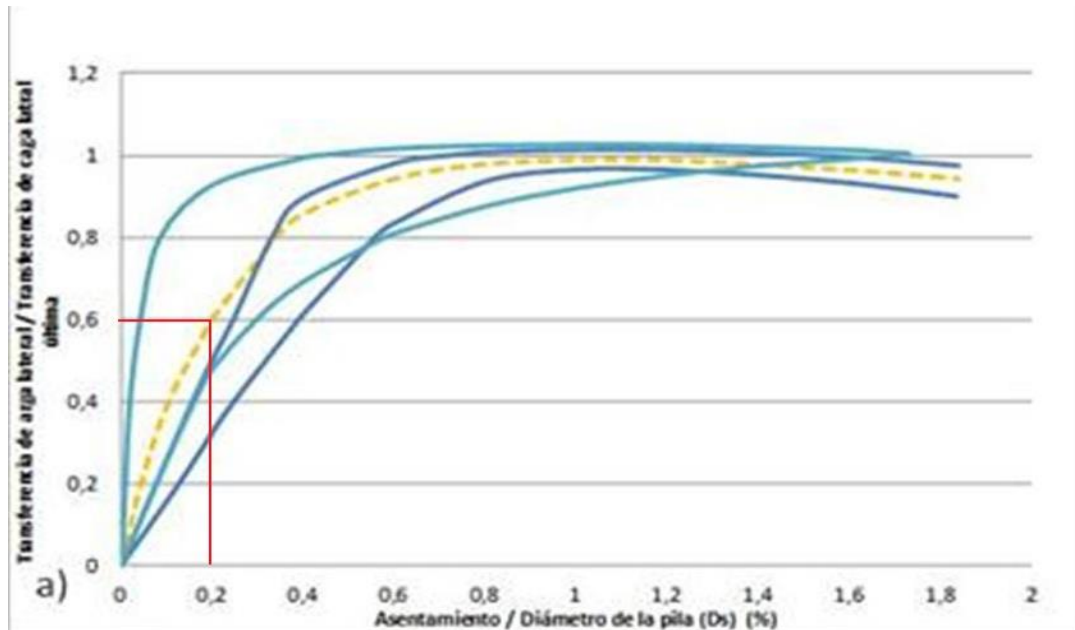
$$f = 0,39 * 16,24 t/m^2 * 0,36 = 2,28 t/m^2$$

$$Q_{fult} = f * A$$

$$Q_{fult} = 2,28 t/m^2 * (\pi * 1m * (15m - 1,5m)) = 96,70 t$$

Calculadas las capacidades ultimas de fuste y punta utilizando las ecuaciones contempladas en la norma API RP 2- A., arrojando unos valores de fuste y punta de 90,34 t y 403 t respectivamente, se entra en las gráficas de capacidades de Reese y O'Neill, para un asentamiento de 2mm, obtenemos los factores A y B asociados a cada capacidad y así obtener la capacidad tanto de fuste como de punta que se desarrollan para ese asentamiento establecido.

Capacidad de fuste en arenas.



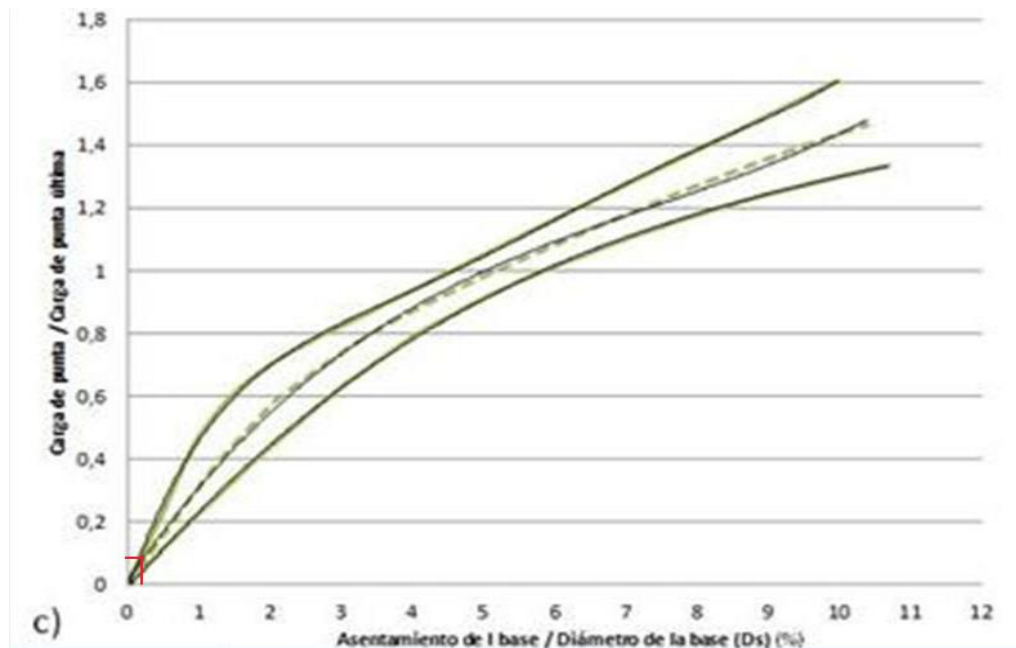
$$\frac{A}{D} = \frac{2mm}{1000mm} * 100 = 0,2\%$$

$$\frac{Q_f}{Q_{fult}} = 0,6$$

$$\frac{Q_f}{96,70} = 0,6$$

$$Q_f = 58,02 \text{ t} \quad \text{para un } A = 2mm$$

Capacidad de Punta en Arenas.



$$\frac{A}{D} = \frac{2\text{mm}}{1000\text{mm}} * 100 = 0,2\%$$

$$\frac{Q_p}{Q_{pult}} = 0,05$$

$$\frac{Q_p}{430} = 0,05$$

$$Q_p = 21,5 \text{ t} \quad \text{para un } A = 2\text{mm}$$

Capacidad total del pilote para un asentamiento de 2 mm.

$$Q_t = Q_f + Q_p$$

$$Q_t = 58,02 \text{ t} + 21,5 \text{ t} = \mathbf{79,52 \text{ t}}$$

El valor Q_t será la fuerza que debe recibir el pilote para que sufra un asentamiento de 2mm, el procedimiento de este ensayo será colocar una carga menor a Q_t e ir golpeando al pilote hasta que llegue a un asentamiento de 2mm o muy cercano a este.

La carga que teórica que debe recibir el pilote (Freal), según lo contemplado anteriormente, para que se le induzca al pilote 5 golpes, esa fuerza debe ser:

$$F_{real} = 0,25 * Q_t$$

$$F_{real} = 0,25 * 79,52 t = \mathbf{20 t}$$

Altura del martillo, considerando las pérdidas en el sistema y un tipo de martillo Vulcan, modelo 2 Tipo S:

$$F_{teorica\ 2} = \frac{F_{real}}{e}$$

$$F_{teorica\ 2} = \frac{20 t}{0,45} = \mathbf{44,44 t}$$

$$V_{martillo} = \frac{F_{(t)} * \left(\frac{2L}{C}\right) * g}{m_{martillo}}$$

$$V_{martillo} = \frac{44,44 * 1000 kg * \left(\frac{2 * 15m}{4000 \frac{m}{seg}}\right) * 9.81 m/seg^2}{1361 kg} = 2,40 m/seg$$

$$t = \frac{V_{martillo}}{g}$$

$$t = \frac{2,40 m/seg}{9.81 m/seg^2} = 0,24 seg$$

$$h_{martillo} = \frac{1}{2} * \frac{9,81m}{seg^2} * (0,24 seg)^2 = 0,2825 m = \mathbf{28,25 cm}$$

Luego se realiza el grafico desarrollado en el presente TEG que corresponde a la sumatoria de las capacidades de fuste y punta en relación a la capacidad total, otorgándole valores de diámetro, capacidad ultima de punta y fuste del pilote en estudio, a las curvas de los investigadores Reese y O'Neill. La suma de estas curvas dio como resultado el grafico de capacidad- asentamiento, el cual resulto ser el siguiente:

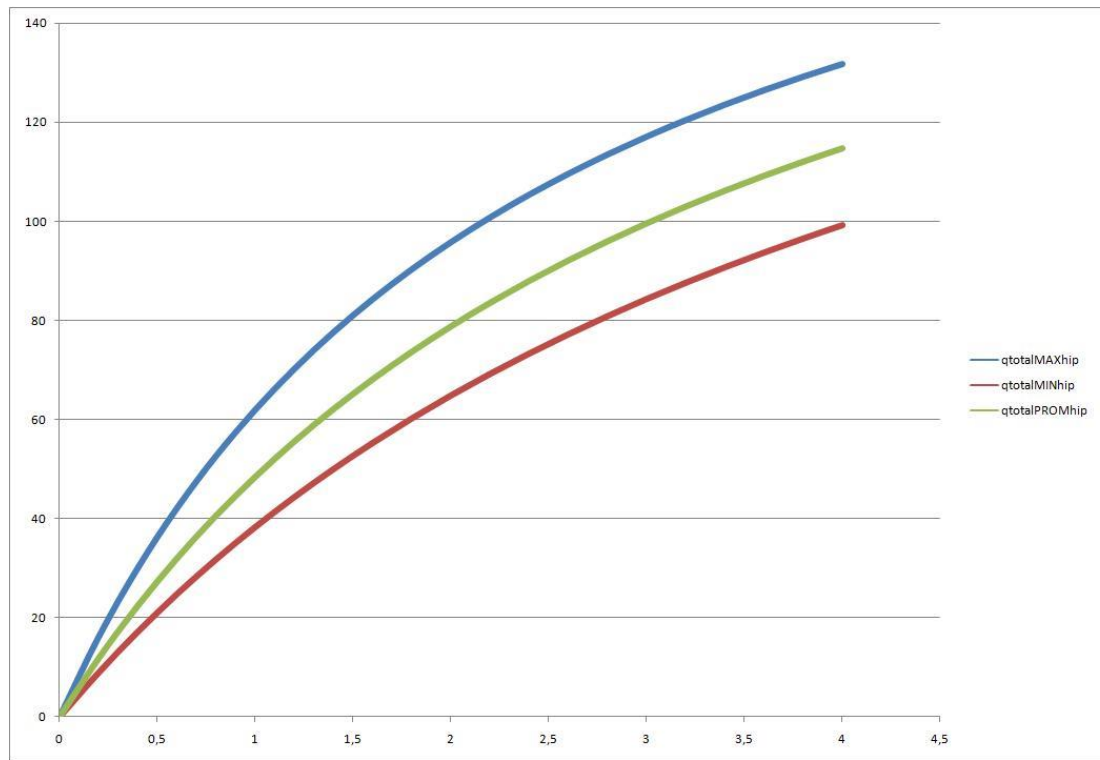


Figura 29. Curvas capacidad-asentamiento para un pilote de 1 m de diámetro.

Fuente: Propia de los autores

Con el asentamiento fijado de 2mm y la sumatoria de la fuerza aplicada en cada golpe que equivale a la carga total real aplicada al pilote, se puede observar la ubicación de la capacidad total que tuvo el pilote con la carga aplicada en los múltiples golpes, cabe destacar que tanto las gráficas de Reese y O'Neill como en la gráfica de capacidad total se observa una curva mínima y una curva máxima que representan el rango de capacidades que existe en un pilote para un mismo asentamiento, tomando en cuenta la posición de este punto en la gráfica total podemos determinar una probabilidad cualitativa de que el pilote desarrolle la capacidad al asentamiento fijado.

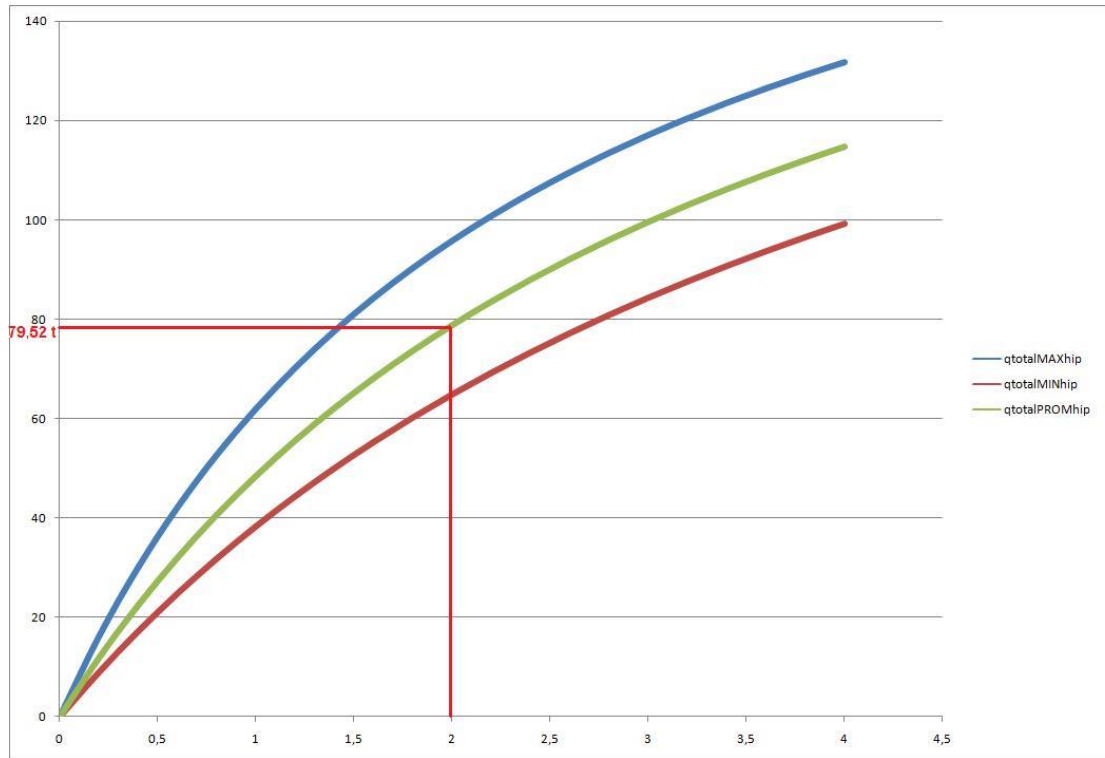
Se pueden presentar los siguientes casos:

1. La carga aplicada con el martillo que es igual 79,52t, resultó ser igual a la suma de los valores promedio de la capacidad de fuste y punta para alcanzar un asentamiento de 2mm en las gráficas de Reese y O'Neill. Quiere decir, que la cantidad de golpes estimados para el ensayo fueron suficientes para

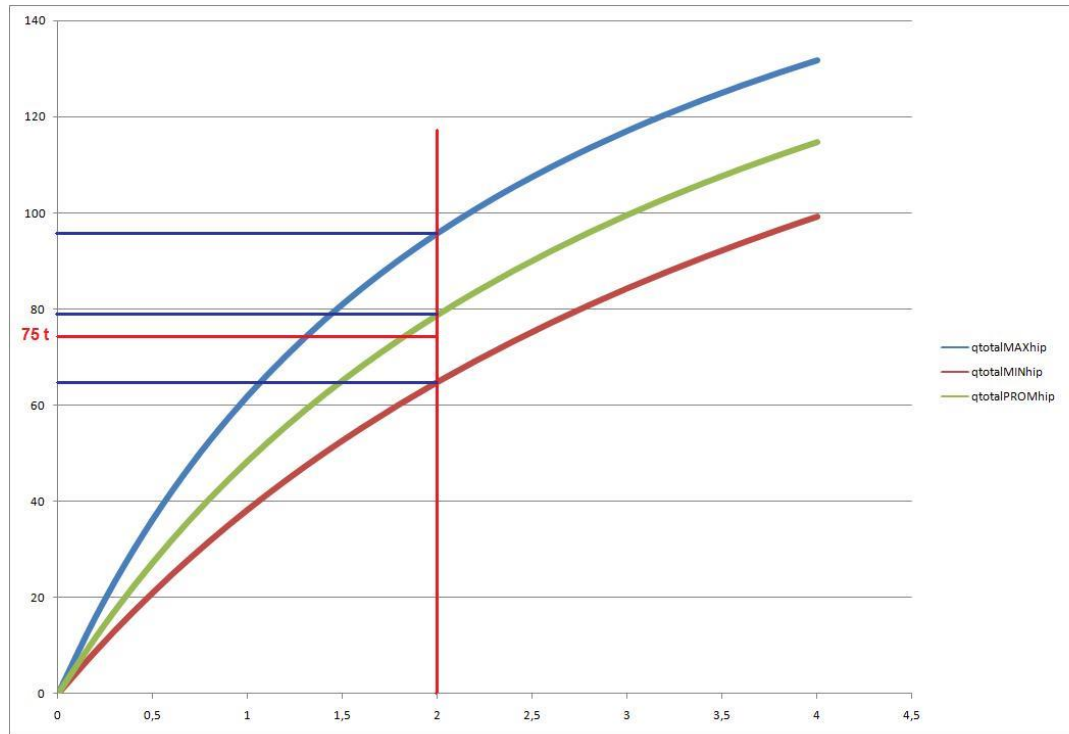
que se asentara 2mm. Por lo tanto la capacidad de fuste y punta son iguales a las estimadas al principio.

$$Q_{fuste} = 58,02 \text{ t}$$

$$Q_{punta} = 21,5 \text{ t}$$



- La carga aplicada con el martillo fue menor a 79,52t, lo que quiere decir que el número de golpes resulto ser menor a los estimados para que se asentara 2mm. En este caso se debe realizar un ajuste por tanteo para determinar la capacidad de fuste y punta a este asentamiento y se debe chequear en qué posición de los rangos de probabilidades se encuentra la carga que fue aplicada. Si suponemos que el martillo le entrego al pilote una carga de 75,00t.



Se puede observar que si resulta una fuerza del martillo igual a 75,00t el pilote entra en el rango de que hay buena probabilidad de que alcance la capacidad deseada a un asentamiento dado. Se procede entonces a realizar el ajuste para determinar la capacidad de fuste y punta a este asentamiento.

Aplicando la formula siguiente:

$$Q_{total} = A Q_{p_u} + B Q_{f_u}$$

Siendo $Q_{total} = 75,00t$

$$Q_{p_u} = 430 t$$

$$Q_{f_u} = 96,70 t$$

Variamos los valores de A y B hasta que la ecuación se cumpla, en este caso se tiene que hacer con valores inferiores a los valores promedios de las gráficas de Reese y O'Neill, por ejemplo.

- Si $A = 0,07$ y $B = 0,50$

$$Q_{total} = 0,07 * 430t + 0,50 * 96,70 t = 78,45 t$$

- Realizando un nuevo tanteo que se aproxime mas a 75,00t, tenemos.

Si $A = 0,065$ y $B = 0,49$

$$Q_{total} = 0,065 * 430t + 0,49 * 96,70t = 75,33 t$$

Este valor es muy aproximado a la carga real que tuvo el pilote, por lo tanto se puede considerar los valores conseguidos de A y B como correctos para estimar las capacidades de fuste y punta para este asentamiento.

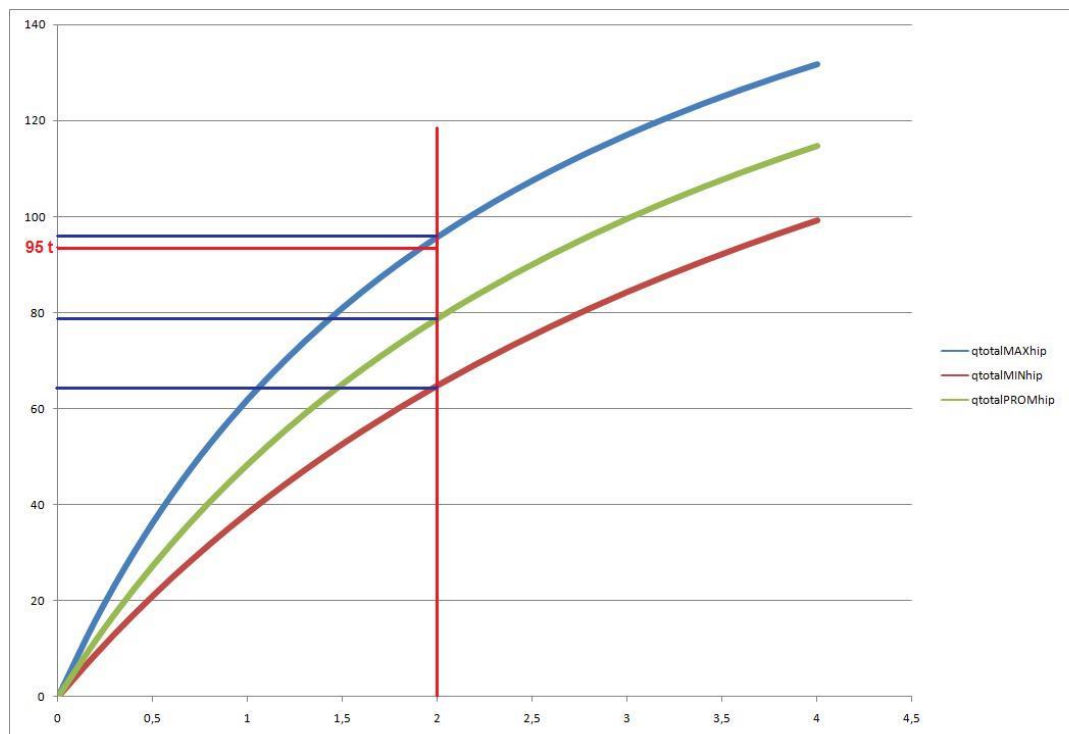
$$Q_f = 0,49 Q_{f_u}$$

$$Q_f = 0,49 * 96,70 t = \mathbf{47,38 t}$$

$$Q_p = 0,065 * Q_{p_u}$$

$$Q_p = 0,065 * 430 t = \mathbf{27,95 t}$$

- La carga aplicada por el martillo fue mayor a 79,52 t, lo que quiere decir que se necesitaron mayor número de golpes para que llegar al asentamiento establecido. Igual que el caso anterior se debe chequear la posición de la carga en el gráfico de capacidad total para estimar la probabilidad que el pilote desarrolle su capacidad. Suponiendo que la carga que le transfiere el pilote al martillo es 95t.



Se puede observar que al introducir el valor de 95t en la gráfica cae en el rango de una muy alta probabilidad de que el pilote desarrolle la capacidad al desplazamiento necesario luego de su instalación, se recurre entonces a calcular los factores A y B con valores aleatorios por encima de los valores promedio de las gráficas de Reesse y O'Neill para determinar las capacidades de fuste y punta que desarrollo el pilote a este asentamiento.

- Realizando varios procesos iterativos se determinó que los valores A y B son:

$$A = 0,073 \text{ y } B = 0,66$$

$$Q_{total} = 0,073 * 430t + 0,66 * 96,70t = 95,21 t$$

Se puede observar que este valor es muy aproximado a la carga real que tuvo el pilote, por lo tanto se puede considerar los valores conseguidos de A y B como correctos para estimar las capacidades de fuste y punta para este asentamiento.

$$Q_f = 0,66 * Q_{f_u}$$

$$Q_f = 0,66 * 96,70 t = \mathbf{63,82 t}$$

$$Q_p = 0,073 * Q_{p_u}$$

$$Q_p = 0,073 * 430 t = \mathbf{31,39 t}$$

De esta manera se resuelven los 3 casos posibles que se pueden presentar al aplicar un Ensayo Dinámico de Baja Energía. Cabe mencionar que en caso de que la carga real que aplicó el martillo se encuentre en el rango de "Poco Probable" para el asentamiento fijado, se deben hacer ajustes estructurales al pilote, ya que el mismo necesitará más asentamiento para desarrollar la capacidad solicitada.

Capítulo V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.

La principal conclusión de este TEG, es que el comportamiento del pilote en pruebas de carga dinámicas es similar al que se genera en pruebas de carga estáticas, solo en el rango de bajos asentamientos; debido a que la reacción dinámica del suelo que debería considerarse en el ensayo dinámico se desprecia, ya que la onda de compresión que se le induce al sistema por el impacto del martillo tiene baja energía, lo que hace que la velocidad de las partículas sea baja en comparación con la velocidad de disipación de energía y es por ello que es despreciable, o tienden a ser despreciable la reacción dinámica del suelo. Debido a esto para realizar la comparación de ambos ensayos se debe mantener un bajo nivel de energía al ejecutar el ensayo dinámico, y gracias a ello se pueden utilizar las curvas de los investigadores Reese y O'Neill desarrolladas a través de pruebas estáticas para la estimación las capacidades de fuste y punta del pilote.

Se logró establecer la diferencia que existe entre un ensayo dinámico de alta energía y un ensayo dinámico de baja energía, donde se pudo observar que la amplitud de la onda generada depende del nivel de energía que se le induzca al sistema y es por ello que un ensayo disipa más energía que otro.

Igualmente se logró calcular la altura que debe tener el martillo para que el ensayo dinámico sea considerado de baja energía y se pudo observar que dicha altura depende de la eficiencia del golpe.

Por otro lado, si se requiere realizar el ensayo dinámico de baja energía es importante destacar que cuando no se tienen celdas medidoras de fuerzas, se puede utilizar el método alternativo descrito por los autores, a pesar que este procedimiento no es tan sofisticado como el que realizan las empresas especializadas, se logra tener un estimado de las capacidades del pilote y dar una alerta temprana acerca de si el pilote alcanzara o no su capacidad para asentamientos admisibles.

También se puede concluir que el principal problema que tienen los pilotes no es alcanzar su capacidad, ya que por lo general estos elementos en la mayoría de los

casos llegan a desarrollar la capacidad con la que fueron diseñados; el problema está en los asentamientos que debe alcanzar el elemento para desarrollar dicha capacidad.

A su vez se logró determinar, según los resultados obtenidos del árbol para el caso de ensayos dinámicos de baja energía calibrado con la data de los alemanes, que una de las variables que más influye en que un pilote no logre desarrollar su capacidad de carga es la integridad estructural, pero además de ello se hace notar que el lavado de la perforación es más importante que la limpieza de la punta para que un pilote desarrolle su capacidad. Esto se debe a que la capacidad por fricción, para asentamientos admisibles es la que más se manifiesta y es por ello que el lavado del pozo debe tener mayor prioridad que el lavado de la punta. Sin embargo siempre se deben cuidar estos aspectos constructivos y llevar la debida inspección.

5.2 Recomendaciones

- Si se quiere hacer uso de las curvas de Reese y O'Neill para estimar las capacidades de fuste y punta de pilotes, se recomienda utilizar las curvas promedio por motivos de seguridad.
- Se recomienda realizar otros estudios para indagar más acerca de las variables involucradas en la estimación de la eficiencia del golpe para distintos tipos de martillos.
- Para realizar pruebas de carga dinámica se recomienda contar con instrumentos que midan tanto el desplazamiento como la fuerza, para tener un resultado más acertado y confiable.

..

BIBLIOGRAFÍA

- Echezuria, Heriberto, “Pruebas estáticas y dinámicas en pilotes”
- Charue, Nicolas, “Pile Dinamic Testing”, (2004).
- Svinkin, Mark, “Engineering Judgement in Determination of Pile Capacity by Dinamic Methods” (2000).
- Rausche, Frank y Sellountou, Evgenia, “Quality Management by Means of Load Testing and Integrity Testing Of Deep Foundations”
- Klingmuller, Oswald and Kirsch, Fabian, “A quality and safety issue forecast in place piles with low strain integrity testing in Germany”, (1998).
- Das, Braja, “Principles of Foundation Engineering” (2014)
- Carrillo, Pedro y Pérez, Gustavo “Ingeniería de Fundaciones”
- Kramer, S “Geotechnical Earthquake Engineering” (1996)
- API RP-2A “Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms- Working Stress Design” (2006)
- Lowery, Lee and Hirsch T.J, “Pile Driving Analysis – Simulation of Hammers, Cushions, Piles and Soils” (2010)
- Rausche, F and Klesney, A “Hammers Types, Efficiencies and Models in GRLWEAP” (2005)
- Timoshenko, S, “Theory of Elasticity” Mc Grow-Hill Book Company 3rd Edition NY (1970)
- Svinkin, M.R “Time effect in determining pile capacity by dynamic method” (2000)
- Gendron, George, “Pile Driving: Hammer and Driving Methods” (1999)
- Gonzalez, Claudia y Romo, Miguel “Estimacion de Propiedades Dinamicas de Arcillas” (2011)

- Sellountou, Evgenia, “Quality management by means of load testing and integrity testing of deep foundations“ (2000).