



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**PROPUESTA PARA NORMA DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO DE LOTES
DE PILOTES**

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:

Quijada Albarracin, Ismael Abraham.

Salvatorelli Capobianco, Gianpaolo Cesar.

PROFESOR GUÍA:

Ing. Echezuría, Heriberto.

FECHA:

Caracas, Junio de 2018.

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**PROPUESTA PARA NORMA DE ACEPTACIÓN Y RECHAZO DE LOTES
DE PILOTES**

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

JURADO EXAMINADOR

HERIBERTO ECHEZURÍA

Nombre:

Firma:

Nombre:

Firma:

Nombre:

Firma:

Nombre del Tutor:

Ing. Heriberto Echezuría



Prestadores:

Quijada A, Ismael A.

Salvatorelli C, Gianpaolo C.

Caracas, 22 de Junio de 2018

DEDICATORIA

Ante todo a Dios por no dejarme en ningún momento solo y así obtener la fuerza necesaria todos los días para lograr esta primera etapa.

A mi abuela por siempre estar cuidándome desde allá arriba, dándome fuerzas para seguir y no dejarme solo en ningún momento.

A mi mamá y a mi papá por ser pilares importantes en mi formación, todo el cariño y amor inculcado, los valores inculcados me han definido como persona y me han enseñado que con perseverancia y trabajo logramos cumplir cualquier meta que nos propongamos, aunque el camino parezca difícil y queramos renunciar siempre es posible superar esta etapa. Para hacer una analogía mis padres son los pilotes de mi casa, son fundamento indispensable, ya que sin ellos es imposible sostenerla.

A mis hermanos, Daniel y Alejandro, aunque a veces nos gritemos y nos respondamos de una manera no adecuada, yo sé que siempre me han apoyado y me han dado su soporte en cualquier paso que doy. Mi hermanos serían la estructura de mi casa, paredes, techo; cuando viene un sismo en esta analogía es cualquier problema que nos enfrentamos en la vida cotidiana, para que nuestra casa no se venga abajo es necesario tener bases y estructuras muy fuertes, que solo se logra resistir con nuestra familia.

A mi perro, Bobby, por el apoyo incondicional y amor entregado, aunque no hable no lo necesita, ya que sus gestos hablan por sí solo, como dice una frase “cada vez que conozco a más personas, más quiero a mi perro”

A mi compañero de tesis y gran amigo Gianpaolo Salvatorelli, por toda la amistad durante el trayecto recorrido de la carrera, por siempre estar allí en todo momento ayudándome en cualquier cosa que necesite. De igual manera a sus padres por toda su ayuda y atención al momento de ir a su casa a estudiar.

A mis grandes amigos y compañeros de carrera Daniel, Krisbel, Egger, Franchesca, Andres, Gisselle, Arianne, Roman, Verónica por estar en todo momento en las buenas y en las malas, enseñándome que con apoyo y compañerismo se logra cualquier meta propuesta.

A mis amigos fuera de la universidad Jesús y Otto por el apoyo y la amistad de hace mucho tiempo.

Ismael Abraham Quijada Albarracin.

DEDICATORIA

A mi padre Riccardo por el apoyo y la fuerza motivacional de siempre seguir adelante, aun en las adversidades que me enfrenté en la carrera y en la vida, por enseñarme que todos los problemas tienen una solución y solo hay que pensar.

A mi madre Mariangela por su dedicación extraordinaria durante cada día de estos años de carrera universitaria, por siempre ayudarme cuando lo necesite, por todo el amor y el cariño que me ha dado y por siempre darme fuerzas para terminar cualquier cosa.

Los quiero mucho, gracias por todo el cariño que me ha dado y por sus enseñanzas.

A mi novia Gisselle por tanto apoyo durante la carrera, por estar siempre allí en los momentos difíciles donde necesite ayuda, por darme tanto amor siempre, y porque la amo.

A mis abuelas Elda y Olga por su alegría y apoyo durante toda la carrera, por siempre darme cariño, las quiero mucho son madres para mí.

A mi hermano Ricardo por el apoyo en el transcurso de la carrera, por siempre estar a mi lado.

A mis abuelos Paolo y Rocco por el amor y el cariño que tenían, por ser tan especiales conmigo. Los quiero mucho y siempre los recuerdo y los recordaré en todo momento.

A todos mis compañeros y en especial a aquellos con quienes estuve durante toda la carrera Daniel e Ismael, por tantas experiencias a lo largo de este camino.

Gianpaolo Cesar Salvatorelli Capobianco.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a nuestro tutor para este trabajo de grado, Ing. Heriberto Echezuría, por guiarnos a lo largo de este trabajo durante tanto tiempo, por confiar en nosotros en todo momento y darnos la oportunidad de desarrollar este gran tema, por ser un gran maestro y atendernos de sorpresa incluso cuando se encontraba muy ocupado. Podemos afirmar que eres un excelente profesor y padrino, tus enseñanzas y apoyo han sido incondicionales y por eso te damos las gracias.

Agradecemos al Ing. Franco Nuzzo y al Ing. Alexander Rivas por la colaboración prestada para el desarrollo de la tesis al transmitir sus conocimientos.

A nuestros compañeros tesisistas Andrés Álvarez y Franchesca Alfonso por la ayuda en el desarrollo del objetivo mutuo.

Agradecemos al Ing. Carlos Rodríguez por su colaboración en el desarrollo de este TEG, y al Ing. José Mora por los conocimientos impartidos en clases que fueron de mucha ayuda.

Atentamente,

Quijada y Salvatorelli.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Resumen	1
1.2 Introducción	2
1.3 Planteamiento del problema	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específicos	4
1.5 Alcance y limitaciones	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	5
2.1 Antecedentes de la investigación	5
2.2. Conceptos básicos	7
2.2.1 Probabilidad	7
2.2.2 Grupo De Muestreo Aleatorio	7
2.2.3 Tipos de muestreo probabilístico	7
2.2.4 Variable aleatoria discreta	7
2.2.5 Distribución De Bernoulli	7
2.2.6 Distribución Binomial	8
2.2.7 Perfil geotécnico	8
2.2.8 Ensayo SPT	9
2.2.9 Fundación	11
2.2.10 Tipos de fundación	11
2.2.11 Pilotes	13
2.2.12 Tipos de pilotes	14
2.2.13 Grupo de pilotes	18
2.2.14 Lotes de pilotes	18
2.3 Bases teóricas	19
2.3.1 Capacidad portante de un pilote	19

2.3.2 Pilotes según su forma de trabajo.....	26
2.3.3 Desarrollo de la capacidad portante de un pilote	27
2.3.4 Factores que afectan al desarrollo de la capacidad portante de un pilote	33
2.3.5 Integridad estructural de un pilote.....	34
2.3.6 Factores que afectan la integridad estructural de un pilote	34
2.3.7 Método Tremie para el vaciado de pilotes	40
2.3.8 Otros factores que afectan la correcta construcción de un pilote	43
2.3.9 Pruebas De Energía	46
2.3.10 Prueba de integridad estructural de pilotes	48
2.3.11 Prueba de baja energía para estimar la capacidad portante	53
2.3.12 Aseguramiento de calidad (QA) y Control de calidad (QC)	55
2.3.13 Plan de inspección.....	56
2.3.14 Nivel aceptable de calidad (AQL).....	58
2.3.15 Curva característica de operación	59
CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO	62
3.1 Tipo de investigación.....	62
3.2 Diseño de la investigación	62
3.3 Delineación de la investigación	62
CAPÍTULO 4: DESARROLLO Y RESULTADOS	64
4.1 Identificación de las variables que afectan la integridad estructural de un pilote	64
4.2 Selección de data histórica para aplicación de modelo estadístico.....	65
4.3 Elaboración de árbol de decisión para estimación de probabilidad de daño estructural.....	66
4.4 Evaluación de la influencia de las variables QA encontradas en la integridad de los pilotes	68
4.5 Data para aplicación del árbol de decisión al hacer fallar las variables que afectan la integridad.....	70
4.6 Aplicación y resultados del árbol de decisión para estimación de probabilidad de daño estructural cuando fallan las variables	72
4.7 Aplicación y resultados del árbol de decisión para estimación de probabilidad de daño estructural cuando fallan las variables más influyentes al mismo tiempo	73

4.8 Identificación de las variables que afectan capacidad portante de un pilote	75
4.9 Selección de data histórica base para aplicación de árbol estadístico	76
4.10 Comprobación de variables que influyen en la capacidad portante de un pilote con base en la data histórica.....	76
4.11 Aplicación y resultados del árbol de decisión para estimación de probabilidad de desarrollo de capacidad portante cuando fallan las variables	78
4.12 Estimación de probabilidad de desarrollo de la capacidad portante de un pilote	79
4.13 Ejemplo de estimación de la capacidad portante	83
4.14 Elaboración de plan de inspección para aceptación y rechazo de pilotes.....	86
4.15 Ejemplos de aplicación del plan de muestreo elaborado	92
CAPÍTULO 5: PROPUESTA DE NORMATIVA.....	93
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
6.1 Conclusiones	105
6.1.1 Con respecto a la estimación de la probabilidad de daño estructural.....	105
6.1.2 Con respecto a la estimación de la probabilidad de alcanzar la capacidad portante	105
6.1.3 Con respecto a la aceptación y rechazo de lotes de pilotes	106
6.2 Recomendaciones	106
Bibliografía.....	107
Anexos	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Probabilidades de obtener un pilote íntegro/no íntegro para la integridad ya ajustadas.	67
Tabla 2. Resultados de aplicación del árbol de decisión para cada ruta.....	68
Tabla 3. Probabilidad de un pilote íntegro/no íntegro para el árbol de decisión.....	68
Tabla 4. Probabilidad de pilote íntegro/no íntegro para falla y cumplimiento de QA.	69
Tabla 5. Probabilidad de pilote íntegro/no íntegro para falla de vaciado.....	70
Tabla 6. Probabilidad de pilote íntegro/no íntegro para falla de agregado.....	70
Tabla 7. Probabilidad de pilote íntegro/no íntegro para falla de asentamiento y vibrado....	71
Tabla 8. Probabilidad de pilote íntegro/no íntegro para falla de verticalidad del acero.....	71
Tabla 9. Probabilidad de pilote íntegro/no íntegro para falla de verticalidad del hoyo.	71
Tabla 10. Probabilidad de pilote íntegro/no íntegro para falla de lavado de pozo.	72
Tabla 11. Probabilidad de pilote íntegro y no íntegro con las diferentes fallas de variables.	72
Tabla 12. Probabilidad de pilote bueno/malo para falla de dos variables.	73
Tabla 13. Probabilidades de obtener un pilote que desarrolla o no su capacidad para cada variable ya ajustadas.	77
Tabla 14. Resultados de aplicación del árbol de decisión para cada ruta.....	77
Tabla 15. Probabilidad de un pilote desarrolle/ no desarrolle su capacidad arrojada del árbol de decisión.	78
Tabla 16. Probabilidad de pilote desarrolla/no desarrolla de capacidad portante según fallas.	78

Tabla 17. Asentamientos recomendados de acuerdo al diámetro del pilote y la relación de estos mismos parámetros en %.....	79
Tabla 18. Plan de inspección por atributos para aceptación y rechazo de lotes de pilotes...	88
Tabla 19. Valores de AQL según la estructura en estudio.	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de perfil geotécnico.	9
Figura 2. Representación gráfica de un ensayo SPT.	10
Figura 3. Representación del aparato cuchara partida para ensayo SPT.	11
Figura 4. Tipos de fundaciones superficiales.	12
Figura 5. Pilote hincado.	13
Figura 6. Tipos de pilotes según su material.	14
Figura 7. Tipos de pilotes según su sección.	15
Figura 8. Pilotes de bulbo.	15
Figura 9. Proceso constructivo para pilotes excavados y vaciados en sitio.	17
Figura 10. Grupo de 3 pilotes unidos mediante cabezal triangular con sus respectivas vigas de arriostramiento y nacimiento de columna.	18
Figura 11. Lote de pilotes hincados.	19
Figura 12. Diagrama de capacidad portante de un pilote.	20
Figura 13. Formas de falla en la punta de un pilote.	23
Figura 14. Factor de capacidad de carga N_q vs ángulo de fricción del suelo.	25
Figura 15. Pilotes de fuste.	26
Figura 16. Pilotes de punta.	27
Figura 17. Interpretación esquemática de una prueba de carga estática sobre un pilote.	28
Figura 18. Curvas de capacidad vs asentamiento normalizadas propuestas por los investigadores Reese y O'Neill para suelos de arcilla y arenas.	29
Figura 19. Curva de desplazamiento capacidad ($Q-z$) para punta de pilotes en arcillas y arenas.	31

Figura 20. Curvas normalizadas de resistencia lateral con asentamiento para arenas y arcillas, denominadas, t-z.....	31
Figura 21. Prueba de carga estática con mediciones de a) Carga aplicada en tope vs Asentamiento y b) Carga transmitida a lo largo de la profundidad del pilote para varios asentamientos.	32
Figura 22. Hoyo completamente vertical ya armado.....	35
Figura 23. Colocación de cajuela de acero.	36
Figura 24. Colocación de cajuela de acero con rodillos de restricción.	37
Figura 25. Falla por asentamiento del concreto.....	38
Figura 26. Falla por falta de vibrado en el concreto.	39
Figura 27. Sistema de tremie con tapón.	42
Figura 28. Detalle para el vaciado.	43
Figura 29. Perfil con pilotes que han sido homogenizados a una misma profundidad.	45
Figura 30. Prueba estática para estimar la capacidad portante.	47
Figura 31. Prueba dinámica para estimar la capacidad portante.	48
Figura 32. Prueba de muy baja energía para verificación de integridad estructural.	49
Figura 33. Resultado de prueba PIT con golpe desde la parte superior del pilote que predice ensanchamiento en el punto de cambio de confinamiento del elemento.....	51
Figura 34. Resultado de prueba PIT con golpe desde la parte superior del pilote que predice estrangulamiento en el punto de cambio de confinamiento del elemento.....	52
Figura 35. Comparación de capacidades medidas en pilotes idénticos ensayados con cargas estáticas y con pruebas dinámicas.	54

Figura 36. Comprobación de resultados obtenidos en campo mediante ensayos dinámico con las curvas estáticas de Reese y O'Neill	55
Figura 37. Comparación de defectos, repartidos en todo el lote vs en un solo sector.....	59
Figura 38.Falla por falta de vibrado en el concreto.....	60
Figura 39.Ejemplo de desarrollo de la capacidad para la fricción.....	83
Figura 40.Ejemplo de desarrollo de la capacidad para la punta.	84
Figura 41.Ejemplo de estimación de desarrollo de la capacidad.....	85
Figura 42. Distorsión angular permitida según estructura.....	89

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Resumen

El presente trabajo especial de grado tiene como propósito intentar solventar el tedioso problema que existe a la hora de aceptar y rechazar lotes de pilotes, debido a la inexistencia de una normativa clara tanto para el contratista como para el contratante, que guíe a una solución a ambas partes.

Se demuestra que hay un grupo de variables que influyen en forma decisiva en la calidad de construcción del pilote, las cuales no están debidamente enfatizadas en las normas QA revisadas para la ejecución de este TEG. En consecuencia, es posible afirmar que lo más importante a la hora de establecer un buen plan para construcción de pilotes, es que el mismo debe basarse fundamentalmente en la buena ejecución en obra de esos aspectos señalados como cruciales en este trabajo.

Se demuestra además, que la probabilidad de obtener pilotes bien hechos históricamente por parte de una empresa, no es tampoco válida para el establecimiento de un plan de aceptación y rechazo, ya que esta probabilidad no refleja adecuadamente las variaciones drásticas dependiendo de las condiciones constructivas de cada obra en particular. En otras palabras, el valor histórico no representa correctamente a cada obra, y es solamente una referencia de la calidad general del desempeño de una empresa.

Para la solución de este problema, se establece un plan de inspección basado en atributos, en donde el pilote queda bien construido o no, habiendo pasado un chequeo de integridad estructural con una prueba de medición de ondas de compresión de muy baja energía que viajan a lo largo del pilote. Luego con base en el argumento de que, si el pilote esta integro estructuralmente, el mismo desarrollará su capacidad portante, mientras que si el pilote no está bien estructuralmente, no será capaz de desarrollar su capacidad. (Se ha demostrado en este TEG con un análisis estadístico basado en data histórica). Este criterio combinado con reglas estadísticas, o sobre aceptación y rechazo con base en muestras de tamaño previamente establecido, se toma la decisión para el lote respectivo.

Es oportuno destacar que también se ha demostrado en este TEG con un análisis estadístico basado en data histórica, la buena coincidencia entre análisis realizados con árboles de decisión, la distribución Binomial y las probabilidades antes mencionadas sobre la calidad de ejecución de los pilotes de la cantidad esperada de pilotes dañados en un lote y su aceptación o rechazo, respectivamente.

De la misma manera, se desarrolla en este TEG un procedimiento basado en ensayos de baja energía e información histórica que permite estimar la probabilidad de que un pilote desarrolle su capacidad admisible.

Con el plan de inspección, se realiza la propuesta de normativa en conjunto con los demás criterios estadísticos para garantizar la validez del mismo y así minimizar los riesgos de aceptar lotes malos y de rechazar lotes buenos.

1.2 Introducción

La inspección de pilotes es un tema bastante complicado debido a que son elementos contruidos bajo tierra, por lo cual es necesario utilizar métodos basados en la propagación de ondas para verificar su integridad.

Sin embargo, por tratarse de un elemento que debe transmitir las cargas al suelo, no es solo suficiente con verificar su integridad como elemento estructural, sino que también es conveniente establecer si los pilotes que resulten bien contruidos alcanzarán su capacidad de transmisión de cargas al suelo correctamente para evitar asentamientos excesivos para las estructuras.

En algunos países desarrollados estos temas se incluyen en los contratos, mientras que en países menos desarrollados, incluyendo el nuestro, los mismos no son debidamente incorporados en los contratos. Esto genera dificultad a la hora de examinar la calidad de los pilotes, ya que con ese esquema no se incluye dicho gasto en los presupuestos, y representan gastos adicionales para las empresas constructoras.

Por otra parte, el no incluir detalles de cómo ensayar y rechazar lotes de pilotes en las contrataciones genera incertidumbre en las inspecciones, y es posible encontrar trabajos detenidos por falta de criterios sobre estos temas.

Este TEG busca por una parte, destacar los factores que afectan seriamente la integridad estructural de un pilote. Por otra parte, se dan las pautas de un plan de inspección que permita la aceptación o rechazo de lotes de pilotes con base en criterios estadísticos. Finalmente, se incluye en este TEG un árbol de decisión que permite establecer en forma aproximada la probabilidad de que pilotes que han quedado bien contruidos presenten problemas para alcanzar su capacidad admisible.

1.3 Planteamiento del problema

En la construcción de pilotes como elemento de fundación, suelen presentarse muchos inconvenientes entre la empresa contratista y el ente contratante respectivo a la hora de aceptar o rechazar la calidad de los mismos, debido a que, generalmente deben construirse numerosos pilotes para lograr transmitir las cargas de las estructuras al suelo.

Este problema se basa fundamentalmente en que no existe una normativa clara que especifique con criterio cuales son las condiciones de aceptación y rechazo de un lote de pilotes, y por ello las empresas contratistas de pilotes siempre buscan cubrirse las espaldas con un récord histórico, en donde muestran su trayectoria construyendo pilotes de buena calidad.

Cuando se presentan inconvenientes o dudas en la calidad de un lote por parte del ente contratante o de la inspección de obra, se deben inspeccionar lotes grandes que en ocasiones pueden alcanzar el cien por ciento de los pilotes o la paralización de las obras, hasta lograr establecer realmente la calidad del lote. En ciertos casos, se procede a entrar en un proceso de improvisación, tanto en el cumplimiento de los requisitos establecidos en diferentes normas sobre QA, como de criterios personales de aceptación y rechazo, en donde se ensayan muchos pilotes y aún no se resuelve el caso, lo cual siempre lleva a problemas innecesarios.

Es por ello, que a fin de lograr una concordancia objetiva entre la empresa contratista y la inspección o cliente, se realiza este análisis de estimación de la probabilidad de obtener un buen pilote desde el punto de vista de integridad estructural y capacidad portante, con las condiciones reales de la obra en particular, en conjunto con la realización de un plan de inspección que se adapte a las condiciones particulares de cada obra, y tome estas variables en consideración. La idea es poder establecer una proposición de base para una normativa clara y concisa, que establezca los criterios adecuados para aceptación y rechazo de pilotes, y que lleve al mínimo la subjetividad en la interpretación de normas tanto de aseguramiento de calidad (QA) como de control de calidad (QC).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Proponer un documento base de normativa para aceptación y rechazo de lotes de pilotes con base en técnicas estadísticas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estimar la probabilidad de daño estructural en el pilote identificando y estudiando las variables que podrían ocasionar malformaciones estructurales o afectación en la geometría y la integridad del pilote.
- Obtener la probabilidad de falla del sistema resistente suelo-pilote considerando la geometría del pilote y el tipo de suelo en el perfil geotécnico.
- Establecer un plan de inspección con base a criterios de aceptación y rechazo de lotes de pilotes que consideren las probabilidades mencionadas en los objetivos anteriores.

1.5 Alcance y limitaciones

En la propuesta que se hará se consideraran pilotes hincados y vaciados en sitio en perfiles geotécnicos de arenas y de arcillas. No se estudiarán casos en donde existan limos o suelos interestratificados.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se encontrarán además de los antecedentes de esta investigación, los términos y definiciones básicas de la ingeniería de suelos, y los principios básicos de pilotes, así como también los diversos factores que afectan su correcta ejecución e integridad. De igual forma, serán presentados los ensayos básicos que se le realizan a los pilotes, que serán utilizados como base para el desarrollo de este trabajo de grado. Por último, todo lo referente a la estadística necesaria para el desarrollo y entendimiento de forma correcta de este documento.

2.1 Antecedentes de la investigación

Las investigaciones que se han realizado anteriormente al trabajo especial de grado aquí propuesto, son las siguientes:

- Mullins, Gray and Ashmawy, Alaa k, “Factors affecting anomaly formation in drilled shafts”, University of south Florida, (2005).

En esta investigación se estudiaron diversos factores que podrían influir en la presencia de malformaciones estructurales de los pilotes. Ellas fueron: contenido de arena en los lodos, técnicas de construcción, limpieza de la excavación, pérdida de asentamiento de la mezcla del concreto durante el vaciado, espaciamiento de la caja o camisa de refuerzo de acero, propiedades de la lechada y el tiempo de apertura del agujero de la excavación.

Para ello, se establecieron cinco tipos de ensayos de laboratorio; encontrándose que el único factor que atenta potencialmente contra la integridad estructural del pilote, ya que afecta significativamente a todas las variables anteriores, es la forma en la que el concreto fluye en la tubería de vaciado “tremie”. Es decir, la variable de afectación estructural de pilotes más importante que se encontró en esta tesis es la forma de vaciado.

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

En esta investigación, el comité de pruebas dinámicas de baja energía para pilotes de Alemania, realizó una recopilación de las pruebas realizadas en el país durante 25 años. Resultando que alrededor del 1% al 2% de todos los pilotes construidos cada año bajo inspección, ha sido ensayado según su data histórica.

Se ensayaron entre 5.000-10.000 pilotes cada año durante esa traza de data, y se obtuvo que al menos el 15% de todos los pilotes ensayados, es decir, 37.500 pilotes presentan algún tipo de señal defectuosa.

Luego de realizar una investigación exhaustiva de ese 15% de pilotes con señal defectuosa, se identificó que solamente un 5% de esa cantidad de pilotes, es decir 12.500 pilotes, presentan realmente algún tipo de defecto (el resto, 10% representa defectos

minúsculos que no se tomaron en cuenta). De este 5% de pilotes llamados defectuosos, solamente un 1%, es decir 2.500 pilotes fueron considerados luego de las averiguaciones respectivas como pilotes que requieren algún tipo de remediación física para poder ser funcionales.

Teniendo en cuenta, que solo el 1% de los pilotes que se sospechaban como defectuosos, son los que realmente requieren algún tipo de remediación, procedieron a realizar las averiguaciones e investigaciones respectivas, y lograron encontrar que un tercio de este porcentaje, se debía a fallas por integridad estructural y dos tercios de este porcentaje se asociaba a problemas en el desarrollo de la capacidad portante de diseño del pilote.

- Ing. Centeno, Roberto, “Inspección y Control de obras civiles”, (1981).

En este documento se presentan diferentes planes de inspección basados en teorías distintas cada uno. El más relevante y que fue de mucha utilidad en el desarrollo de este TEG fue el “plan de inspección 4”, que se basa en inspección por atributos.

Este plan fue adaptado por el autor de ese documento para la aceptación o rechazo de lotes de terraplenes, utilizando los planes de inspección por atributos estandarizados por las normas Military standard 105E, “Sampling procedures and tables for inspection by attributes”, (1989).

Los planes de inspección por atributos se basan en la toma de muestras que luego son ensayadas o estudiadas con alguna característica visible que indique su aceptación o rechazo respecto a algún criterio. Luego mediante la utilización de una curva característica de operación en donde se fije un AQL, y un criterio de cantidad máxima de unidades defectuosas admisibles para no comprometer el lote, se acepta o se rechaza el lote.

- Military standard 105E, “Sampling procedures and tables for inspection by attributes”, (1989).

Este documento presenta una normativa para planes de inspección basados en atributos que ha sido utilizado por el cuerpo de militares de los Estados Unidos para la aceptación y rechazo de lotes de equipamiento militar durante muchos años.

Estos planes de inspección presentados en la normativa fueron contruidos con curvas características de operación tomando una muestra definida según el tamaño del lote, un AQL y una calidad limite aceptable que no comprometa ni al comprador ni al vendedor, a los cuales también se les fijó un riesgo asociado.

2.2. Conceptos básicos

A continuación, se presentan los conceptos básicos necesarios para el entendimiento de este trabajo especial de grado:

2.2.1 Probabilidad

Es una medida, de la posible ocurrencia de algún evento cuando se realiza un experimento, usualmente se denota con la simbología: $P(A)$ donde “A” es el evento y toma valores del 0 al 1, el valor mínimo del evento es 0% de posible ocurrencia, es decir, no ocurrirá en ninguna de las ocasiones que se realice el experimento; si por el contrario el evento toma el valor máximo 1, indica que el 100% de las veces que se realice el experimento este evento ocurrirá.

2.2.2 Grupo De Muestreo Aleatorio

Llamamos a un muestreo aleatorio a establecer un número representativo (n) de una población, logrando solo ensayar este número representativo y obtener resultados en un menor tiempo, pero totalmente factibles y con las características de toda la población.

2.2.3 Tipos de muestreo probabilístico

- Muestreo aleatorio simple: es el método más simple de todos y el más usado, consiste en enumerar cada individuo de la población y seleccionar de manera aleatoria una muestra del tamaño requerido, a través de algún medio como: dados, números generados por computadora, bolas dentro de una bolsa, entre otros.
- Muestreo aleatorio sistemático: Se parte del número (i) y los demás individuos seleccionados de la muestra serán $i, i+k, i+2k, i+3k, \dots, i+(n-1)k, i+nk$, donde k es el resultado de dividir el tamaño de la población entre el tamaño de la muestra $k = N/n$. El número (i) se selecciona de manera aleatoria entre 1 y k .
- Muestreo aleatorio estratificado: Cuando la muestra incluye subgrupos (estratos), hay que separarlos y conseguir una muestra representativa de cada estrato, para así lograr una representación adecuada de toda la población. Se puede usar el muestreo aleatorio simple o sistemático para cada estrato.

2.2.4 Variable aleatoria discreta

Se dice que x es una variable aleatoria discreta, si x toma valores enteros entre el intervalo $[a, b]$.

2.2.5 Distribución De Bernoulli

Modelo matemático para calcular la probabilidad de un evento aleatorio cuando este tiene dos posibles resultados: “Éxito” o “Fracaso”, además de ser ensayos independientes; es decir el resultado de ese ensayo no afecta a los demás ensayos. Por ejemplo, el lanzamiento de una moneda: al lanzar una moneda siempre hay dos posibles resultados

“Cara” o “Cruz”, y el resultado de este no afecta la probabilidad en el próximo lanzamiento.

La distribución de Bernoulli toma valores del 1 al 0, donde denotamos “P” como la probabilidad de éxito y al fracaso como su complemento $1 - p$.

2.2.6 Distribución Binomial

El experimento binomial tiene características similares a la de Bernoulli, pero en este caso interesa el número de resultados “exitosos” en el experimento.

Características de un experimento binomial:

- La cantidad de ensayos que se realizan es finita. Sea esta la cantidad n .
- Cada ensayo tiene únicamente dos resultados posibles: “Éxito” o “Fracaso”.
- Todos los ensayos son realizados son independientes.
- La probabilidad de “éxito: en cada ensayo permanece constante. Sea este valor p .

Donde la función de distribución es:

$$F(X) = \binom{n}{x} * p^x * (1 - p)^{n-x}, \quad x = 0, 1, 2, \dots, n \quad \text{Ec. 1}$$

X: Variable aleatoria discreta cuyo valor representa la cantidad de ensayos considerados “éxitos” en una serie de n ensayos realizados.

$X = 0, 1, 2, \dots, n$ Valores que puede tomar X.

P: valor de probabilidad de que cada resultado sea “éxito”.

2.2.7 Perfil geotécnico

Un perfil geotécnico es una representación de las condiciones del suelo, que se usa para poder identificar como se encuentran distribuidas las capas o estratos del suelo, si se encuentra alterado o inalterado. Con esta información se pueden tomar las respectivas muestras que se necesitan para conocer las condiciones exactas del suelo en el cual se va a realizar una construcción.

Generalmente el suelo se divide en capas, donde la superficial se encuentra con presencia de organismos o materia orgánica que perturban el suelo, pero a medida que aumenta su profundidad este es cada vez más firme y menos alterado por agentes climáticos o externos. En un perfil geotécnico, se encuentran diversos tipos de suelos, es decir existe interestratificación o también se pueden hallar suelos homogéneos, los cuales serán objeto de esta tesis en materia de arcillas y arena.

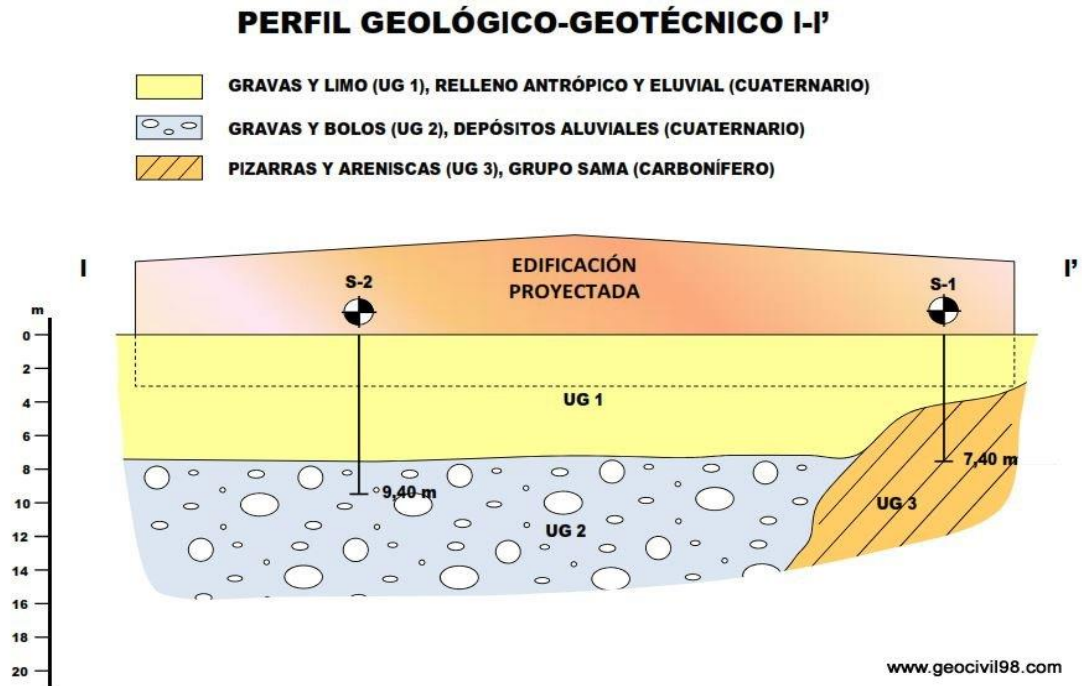


Figura 1. Representación de perfil geotécnico.

Fuente. “Estudio geotécnico para el Principado de Asturias en Sotiello”, Geocivil 98, (2015). Recuperado de: geocivil98.com/geotecnicos/1/estudios/34/claves/Estudio-geotecnico-para-el-Principado-de-Asturias-en-Sotiello-empresa-estudios-geologicos-geotecnicos-ambientales

2.2.8 Ensayo SPT

El ensayo de penetración estándar es un ensayo de campo, en donde se realiza una perforación exploratoria con el fin de obtener tanto información geológica-geotécnica con ayuda de un muestreador, como también la resistencia a la penetración de un suelo utilizando un martillo como se explicará a continuación.

Este ensayo se realiza con un muestreador llamado “Cuchara Partida”, el cual se hince con un martillo de 140lb de peso que se deja caer desde una altura de 76cm. El mismo se basa en que según el número de golpes necesarios para penetrar el muestreador a través del suelo en una distancia estándar igual a 30cm, se puede obtener la resistencia a la penetración.

Con el mismo equipo, se pueden retirar muestras del terreno donde se realizó la prueba a diferentes profundidades, para así poder ejecutar los ensayos correspondientes de identificación geológica-geotécnica del suelo para todo el perfil.

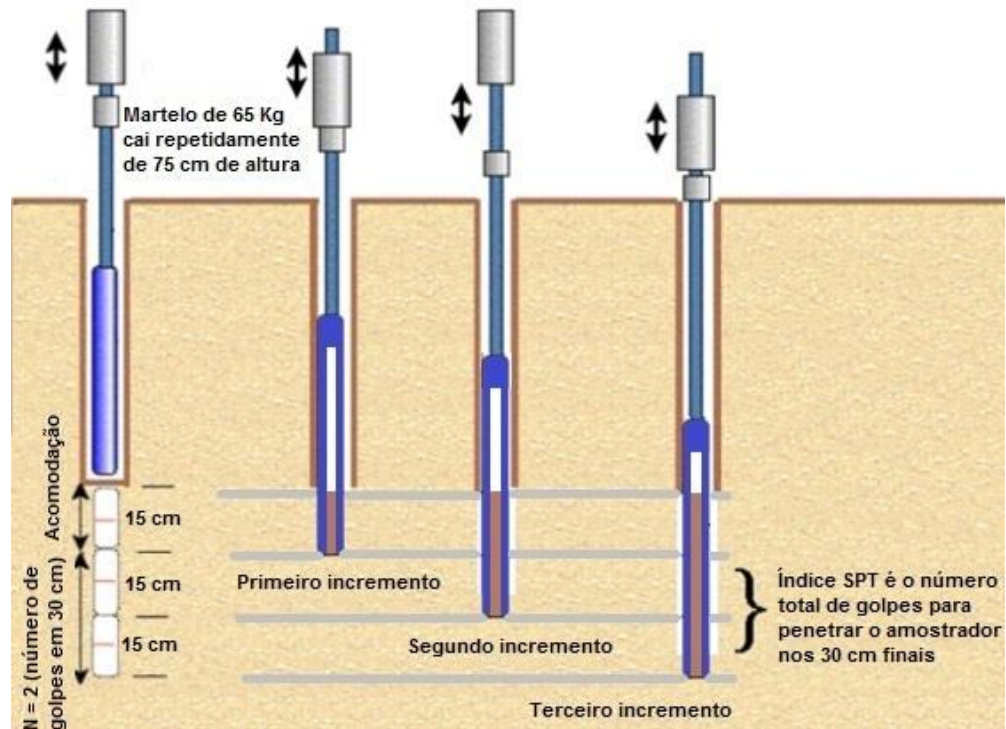


Figura 2. Representación gráfica de un ensayo SPT.

Fuente. “Sondeo a percusión”, Oliveira, R, (2013).

Recuperado de: <http://m2sondagem.com.br/sondagem-a-percussao>.

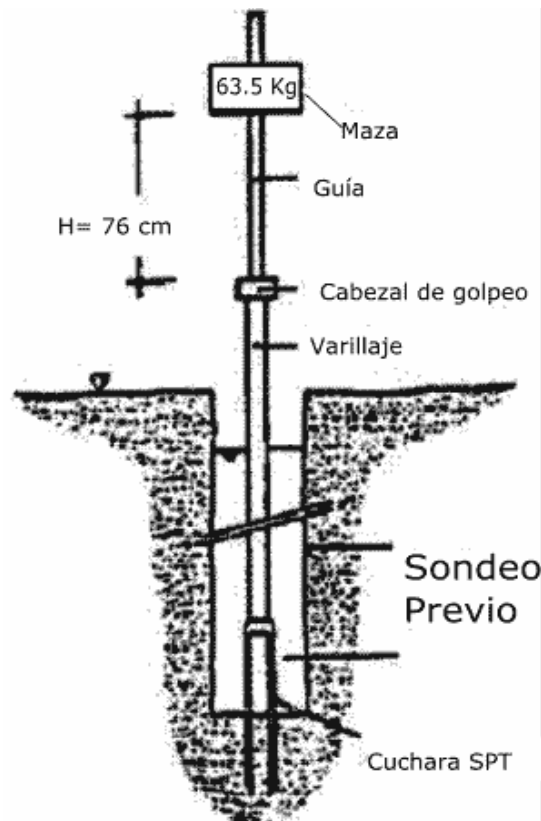


Figura 3. Representación del aparato cucharita partida para ensayo SPT.

Fuente. “Ensayo de penetración estándar”, (2018).

Recuperado de: <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/estudios-geotecnicos/ensayo-spt/>

2.2.9 Fundación

Desde el punto de vista de la ingeniería civil se conoce este concepto desde dos ámbitos que tienen una relación directa:

- Desde la percepción de la ingeniería de suelos, es la masa de suelo que recibe las cargas provenientes de la estructura.
- Desde la percepción de la ingeniería estructural, es el elemento que transmite las cargas de la superestructura al suelo de fundación.

2.2.10 Tipos de fundación

Dependiendo de la profundidad a la cual se encuentra el suelo firme existen tres tipos de fundación; ellas son:

- Fundaciones superficiales: se les llama así a aquellas fundaciones cuya relación de ancho-profundidad es menor o igual a uno.

$$D/B \leq 1$$

Se conocen comúnmente como zapatas, y se presentan en varias formas (rectangulares, cuadradas, circulares, etc.); además según el tipo de cargas y de las condiciones de apoyo se puede recurrir a zapatas de tipo aislado, de tira, combinadas, conectadas, etc.

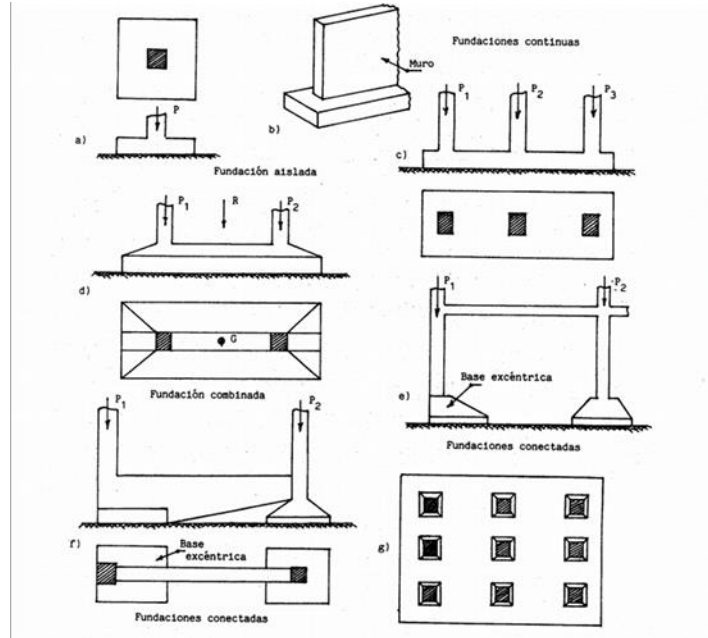


Figura 4. Tipos de fundaciones superficiales.

Fuente. “Fundaciones directas”, Betancourt, M, (2015). Recuperado de:
<http://elmundodelasfundaciones.blogspot.com/>

- Fundaciones profundas: se les llama así a aquellas fundaciones cuya relación de ancho-profundidad es mayor de uno, pero menor de 5.

$$1 < D/B < 5$$

En este caso se puede recurrir a las mismas formas de fundación mencionadas anteriormente, teniendo en cuenta que la excavación en estos casos requiere comúnmente de entibados o cajones.

- Pilotes o pilas: se les llama así a aquellas fundaciones cuya relación de ancho-profundidad es mayor de 5.

$$D/B > 5$$

Son elementos cilíndricos, tronco-cónicos, prismáticos, de bulbo, en I, en H o en +, que transmiten la carga a estratos más profundos cuando el estrato superior es blando.

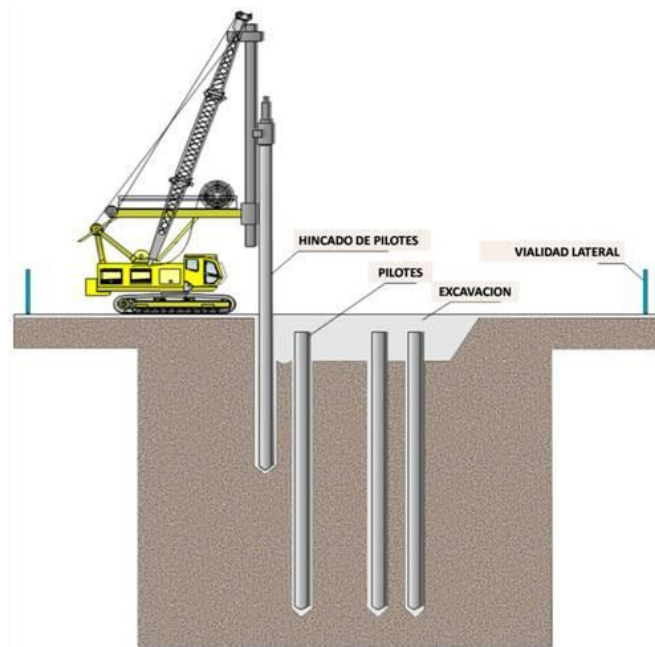


Figura 5. Pilote hincado.

Fuente: “Civilgeeks”, Ing. Luis N, (2017).

Recuperado de: <https://civilgeeks.com/2014/01/13/pilotes-de-cimentacion-para-la-construccion/>

2.2.11 Pilotes

Los pilotes son elementos esbeltos y alargados que se utilizan para transmitir las cargas de la superestructura al suelo cuando el estrato portante se encuentra a profundidades muy grandes. Estos elementos se pueden clasificar según su material, forma geométrica, forma constructiva, desplazamiento, etc.

Algunos casos muy comunes en donde se requiere de este tipo de elementos son:

- Estructuras que someten las fundaciones a esfuerzos de tracción.
- Presencia de arcillas expansivas en el perfil geotécnico que someten a la estructura a hinchamientos y retracciones.
- Baja capacidad portante del suelo a nivel superficial que no permite distribuir las cargas transmitidas por la estructura de manera correcta, ya que se tendrían asentamientos imprevistos y excesivos.
- Perfiles geotécnicos en donde hay presencia de nivel freático muy cercana a la superficie.
- Edificaciones situadas sobre agua.

Se pueden encontrar pilotes de distintos tipos de material tales como: acero, madera, concreto armado, etc.

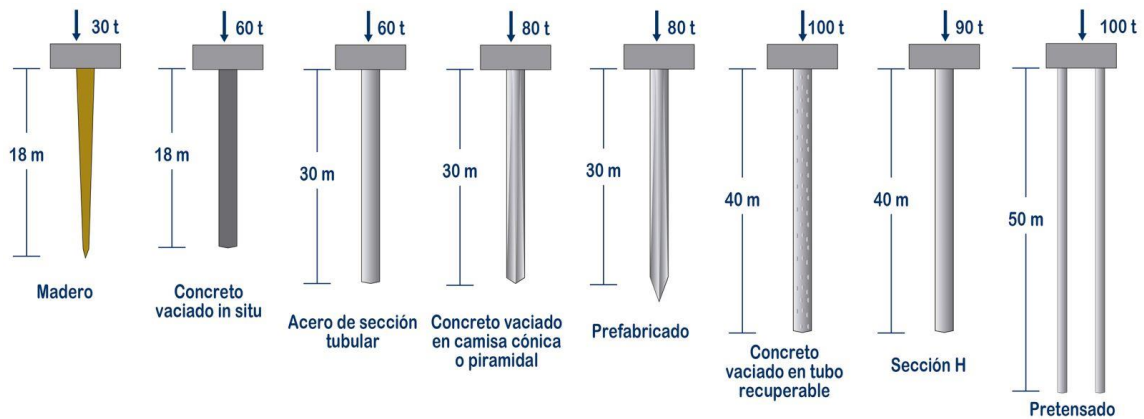


Figura 6. Tipos de pilotes según su material.

Fuente. “Los pilotes”, Unicon, (2018).

Recuperado de: <http://www.unicon.com.pe/principal/noticias/noticia/los-pilotes/351>

2.2.12 Tipos de pilotes

La característica más importante de los pilotes se debe a su forma de interacción con el suelo en el momento de la construcción, teniendo en ello dos tipos:

- Con desplazamiento: Son aquellos que desplazan el suelo al momento de la penetración, generalmente son:
 - ✓ Forro Hincado, relleno de concreto posteriormente. Puede recuperarse el forro o no dependiendo del método constructivo.
 - ✓ Prefabricados hincados por percusión o con gatos mecánicos (Pueden ser de concreto o de acero en este tipo).
- Sin desplazamiento: Son aquellos que no desplazan el suelo debido a que se excava la sección del mismo a la medida con diferentes métodos de excavación (Sonda, Rotativa, Almeja, etc.).

Comúnmente se conoce a los pilotes como dos tipos según su forma de construcción:

➤ Pilotes hincados

A este tipo de pilotes se les llama también como prefabricados ya que son armados y vaciados fuera de la superficie, generalmente en un taller fuera de la obra, desde donde son transportados a la misma para ser utilizados.

Estos pilotes deben ser capaces de soportar tanto las cargas de izamiento o eslinga que se producen durante su transporte como las cargas de hincado en sitio que generalmente son golpes dados por un martillo.

Existen varios tipos de pilotes hincados, incluyendo sección uniforme, troncocónicos o sección variable más anchos en el tope que en la punta, caimanes o de sección variable más anchos abajo que arriba y tubulares de acero.

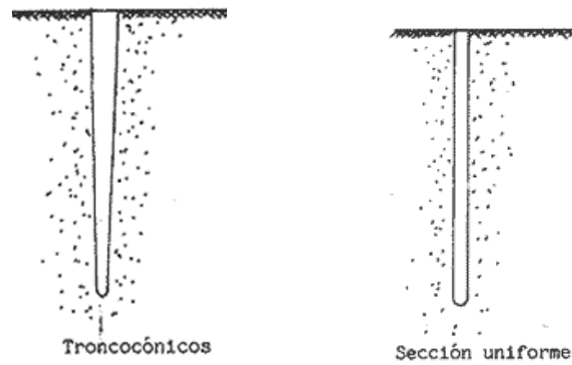


Figura 7. Tipos de pilotes según su sección.

Fuente. “Fundaciones profundas”, Ing. Sassani, (2017).

Recuperado de: <https://estudiosassani.wordpress.com/2017/01/30/tipos-clasificacion-de-pilotes-fundaciones-profundas/>

Además, existe una variación de este tipo de pilote que se realiza en sitio conocido como pilotes de bulbo, los mismos son elaborados hincando a golpes un forro hasta que se alcanza suelo firme y se coloca una base de piedra picada que es golpeada hasta formar el bulbo. Una vez hecho esto se coloca el concreto y se retira el forro.

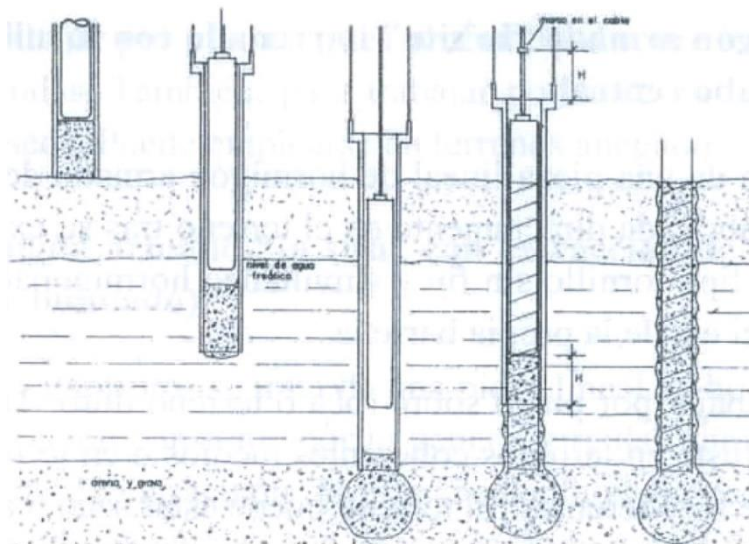


Figura 8. Pilotes de bulbo.

Fuente. “Cimentaciones especiales”, Universidad de Navarra, (2014).

Recuperado de: <http://www.unav.edu/departamento/bcp/picturesCimInSitu01.html>

➤ Pilotes excavados

A este tipo de pilotes se les conoce generalmente como “Vaciados en sitio”, se caracterizan por siempre seguir un esquema constructivo que consiste en realizar una excavación o perforación en el terreno, luego insertar el acero de refuerzo correspondiente al cual se le conoce como cajuela y posteriormente proceder rellenar el agujero con concreto que preferiblemente debe ser suministrado por una concretera o premezclado.

De acuerdo a los esfuerzos transmitidos por la estructura, las variables económicas y a las características del perfil geotécnico (nivel freático, dureza, etc.) en donde se realiza la perforación se utilizan diferentes métodos constructivos que varían fundamentalmente en la forma de realizar la perforación, es por esto que los pilotes excavados se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- Pilote excavado en seco

En este tipo de pilote la perforación se realiza sin ninguna ayuda de contención de las paredes, ya que el suelo del perfil posee una cohesión suficiente como para mantenerse el tiempo necesario para construir el pilote, y además no existe presencia de nivel freático en el desarrollo del mismo.

Se perforan con hélices continuas o cucharas rotativas que por estar siempre en contacto con las paredes de cierta forma lo mantienen, ya que son suelos que generalmente no poseen la dureza suficiente como para necesitar el uso del cincel.

- Pilote excavado con forro

En este tipo de pilotes se utiliza un forro en su mayoría metálico que se conoce como “camisa”, el cual es el que sostiene las paredes de la perforación debido a que el suelo del perfil no posee las propiedades necesarias para sostenerse por sí mismo y habría múltiples derrumbes que ocasionarían problemas de integridad estructural. Además, es muy utilizado en suelos que sean extremadamente permeables como las gravas o arenas gruesas en donde no se puede utilizar lodos bentónicos que ayuden al sostenimiento de las paredes por que se perdería.

Existen dos variaciones que se pueden mencionar:

1. Forro recuperable

En este método el forro es introducido ya sea por rotación, percusión o roto-percusión hasta la cota final del pilote, luego es retirado con cuchara o hélice el material en el interior de la camisa para luego insertar la cajuela de acero y proceder al vaciado en donde a medida que se va rellenando el agujero el forro es extraído lentamente, de manera que el concreto sostenga las paredes y el forro pueda ser reutilizado.

2. Forro perdido

Este método es exactamente igual al anterior, con la única diferencia de que el forro no es extraído en el vaciado, sino que se deja como perdido dentro del pilote. Es utilizado generalmente en casos donde el pilote deba ser protegido de corrientes de agua, suelos que induzcan mucha fricción negativa cargando al pilote o en suelos muy agresivos para el concreto; no son muy comunes debido a su elevado costo.

- Pilote excavado con lodos o húmedo

Son pilotes que se utilizan cuando el nivel freático es muy elevado, y para poder realizar la perforación sin problemas de derrumbes debe generarse una sobrepresión que estabilice el agujero. Esto se logra con lodos, ya sean poliméricos o bentónicos que generan suspensiones mucho más densas que el agua y estabilizan la perforación.

Este método constructivo no puede utilizarse en suelos muy permeables debido a que el lodo se pierde en el terreno y esto eleva muchísimo el costo de los pilotes, ya que de por sí este método es uno de los más costosos y debe utilizarse cuando sea necesario.

Consiste en ir realizando la perforación y contar con una estación de recirculación de lodos en la cual se vaya reciclando y recirculando el lodo hacia el agujero, luego al llegar a la cota deseada insertar la cajuela de acero y vaciar utilizando el método tremie únicamente, previamente habiendo descontaminado el lodo de las arenas que puedan causar problemas antes del vaciado.

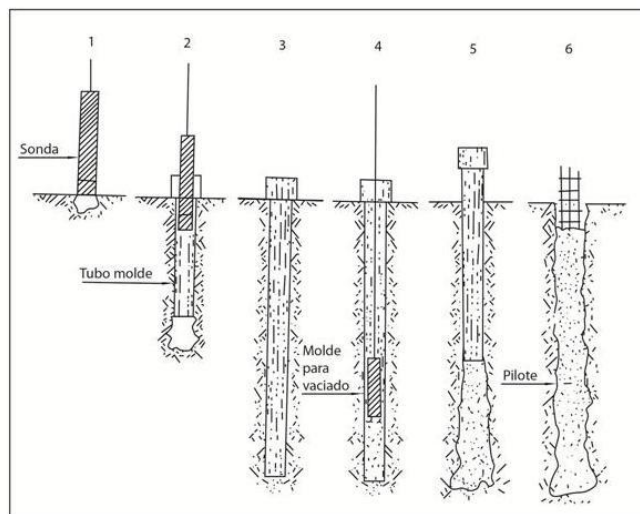


Figura 9. Proceso constructivo para pilotes excavados y vaciados en sitio.

Fuente: Apuntes de Ing. Heriberto Echezuría, QA-QC para fundaciones profundas.

2.2.13 Grupo de pilotes

Dependiendo de las cargas inducidas por la estructura y de la capacidad de los pilotes, se debe recurrir a generar agrupaciones de pilotes para transmitir de manera homogénea las mismas.

Es por ello, que los pilotes se unen a través de un elemento estructural conocido como “cabezal”, el cual es el nacimiento de una o varias columnas de la edificación. En el cabezal se deben cumplir separaciones mínimas de los pilotes para su trabajo de manera adecuada.



Figura 10. Grupo de 3 pilotes unidos mediante cabezal triangular con sus respectivas vigas de arriostramiento y nacimiento de columna.

Fuente. “Generador de precios”, CYPE Ingenieros, (2012).

Recuperado de:

http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/Cimentaciones/Encepados/De_pilotes/Encepado_de_grupo_de_pilotes.html

2.2.14 Lotes de pilotes

Se conoce como lote a todos aquellos pilotes bien sea individuales o en grupos que conforman la totalidad de elementos necesarios para la fundación de una estructura.



Figura 11. Lote de pilotes hincados

Fuente. “Pilotes prefabricados”, Ingeniero de caminos, (2012).

Recuperado de: <https://ingeniero-de-caminos.com/pilotes-prefabricados/>

2.3 Bases teóricas

En este apartado se presentan todas las bases teóricas necesarias para el correcto entendimiento de este TEG.

2.3.1 Capacidad portante de un pilote

La capacidad portante de un pilote aislado desde su punto de vista geotécnico, es decir, la manera en que el mismo transmite las cargas provenientes de la superestructura al suelo se compone de dos variables: Fricción lateral (fuste) y capacidad de punta.

$$\text{Capacidad Última del Pilote } (Q_u) = \text{Capacidad punta última } (Q_{pu}) + \text{Capacidad fuste última } (Q_{su}) \quad \text{Ec. 2}$$

La capacidad portante última de un pilote es la máxima carga que el pilote puede soportar.



Q_u = Capacidad de carga última del pilote

Q_{pu} = Capacidad de punta última

Q_{su} = Capacidad de fuste última

$Q_u = Q_{pu} + Q_{su}$

Figura 12. Diagrama de capacidad portante de un pilote.

Fuente: Lambe, W y Whitman, R “Mecánica de Suelos”, (1979), pág. 525.

Resistencia por fuste

Es la fuerza que ocurre en consecuencia del contacto entre el concreto (pilote) y el suelo. Esta se genera por el desplazamiento del pilote dentro del suelo debido a que existe un empuje pasivo sobre el pilote.

Según Lambe, W y Whitman, R “Mecánica de Suelos”, (1979), Capítulo 33, la resistencia por el fuste depende no solamente del tipo de pilote sino también del método constructivo utilizado, ya que este puede tener un efecto importante sobre el grado de perturbación del terreno, los esfuerzos laterales que actúan sobre el pilote, el ángulo de fricción e incluso la superficie de contacto.

La ecuación general de cálculo para la resistencia por fuste siempre tiene la siguiente forma:

$$Q_{su} = (as) * \left(\sum \Delta L \right) * (Ss) \quad Ec. 3$$

En donde

as = Área lateral del pilote en la longitud ΔL en contacto con el suelo

ΔL = Incremento de la longitud del pilote

Ss = Resistencia unitaria por el fuste

Dependiendo de cada investigador se tendrán diferentes valores de resistencia unitaria de fuste; por lo que la dificultad real del cálculo de los esfuerzos transmitidos por el fuste radica en la elección del valor adecuado de este parámetro.

Teniendo en cuenta esto, se puede definir la resistencia por fuste para los diferentes tipos de suelo, siguiendo las recomendaciones de la norma API RP 2A-WSD (2000):

1. Suelos permeables

En suelos permeables como la arena la resistencia unitaria por el fuste vale:

$$Ss = \tau_{ff} = \sigma_{ff} * \tan \varphi \quad Ec. 4$$

En donde

$$\sigma_{ff} = \sigma_{ho} = K * \sigma_{vo} \quad Ec. 5$$

Quedando entonces

$$Ss = K * \sigma_{vo} * \tan \varphi \quad Ec. 6$$

En donde

φ = ángulo de fricción del suelo

σ_{vo} = esfuerzo vertical efectivo

K = factor de aumento del empuje pasivo = 0.80

El factor K, se fundamenta en que los pilotes en arena generalmente se hincan, y por ello las vibraciones ocasionadas en el proceso aumentan la compacidad del suelo en un radio de acción que puede llegar hasta ocho veces el diámetro del pilote. El aumento de la compacidad, da lugar a un aumento del ángulo de fricción, lo que genera el esfuerzo horizontal aplicado sobre la superficie del pilote en un valor K; dicho valor varia se toma en 0.80.

2. Suelos no permeables

En general, la velocidad de construcción de la estructura es mayor a la velocidad de drenaje de los suelos no permeables, esto quiere decir que el pilote estará cargado a su capacidad máxima antes de que el drenaje total ocurra. Es por esto, que resulta razonable emplear la resistencia al corte sin drenaje como valor aproximado de la adherencia de las arcillas al fuste del pilote, sin embargo, existen diversos factores que deben tomarse en cuenta en la elección del valor apropiado de la resistencia al corte sin drenaje.

Numerosas investigaciones muestran que existe un fenómeno de remoldeo de las arcillas en pilotes hincados que produce la resistencia al corte en las proximidades del pilote se reduce por la hincada, pero al pasar alrededor de un año de tiempo la resistencia pasa a ser considerablemente mayor que la inicial. Este fenómeno se debe a la perturbación y al aumento de la presión intersticial al momento del hincado, pero luego debido a la consolidación se recupera la resistencia y se disipa la sobrepresión intersticial.

Esto trae como consecuencia que, para arcillas normalmente consolidadas, la resistencia que debe usarse para estimaciones conservadoras debe ser sin drenaje, mientras que en suelos sobre-consolidados se utiliza una resistencia menor que la tendencia sin drenaje.

Entonces, el valor de la resistencia unitaria por fuste para suelos no permeables según API RP 2A-WSD (2000), es:

$$S_s = \alpha * C_u \quad Ec. 7$$

En donde

C_u = Resistencia al corte no drenada en el punto en cuestión

$$\alpha = \text{Factor adimensional, calculado con } \alpha = 0.31 + 0.17 * \frac{P_{atm}}{C_u} \leq 1 \quad Ec. 8$$

Resistencia por punta

Según Lambe, W y Whitman, R “Mecánica de Suelos”, (1979), Capítulo 33, los principios de capacidad de carga de las cimentaciones superficiales son también aplicables a las fundaciones profundas como los pilotes.

La principal diferencia respecto a las fundaciones superficiales radica en que la posición de la superficie de falla para los pilotes es menos conocida y se rige de acuerdo a diferentes criterios propuestos por investigadores.

Cada investigador ha propuesto su modelo de la forma de falla bajo una cimentación profunda y con ello han calculado diversos factores de capacidad de carga. A continuación, podemos ver las formas de falla bajo una fundación profunda según cada investigador:

Propuesta para norma de aceptación y rechazo de lotes de pilotes.

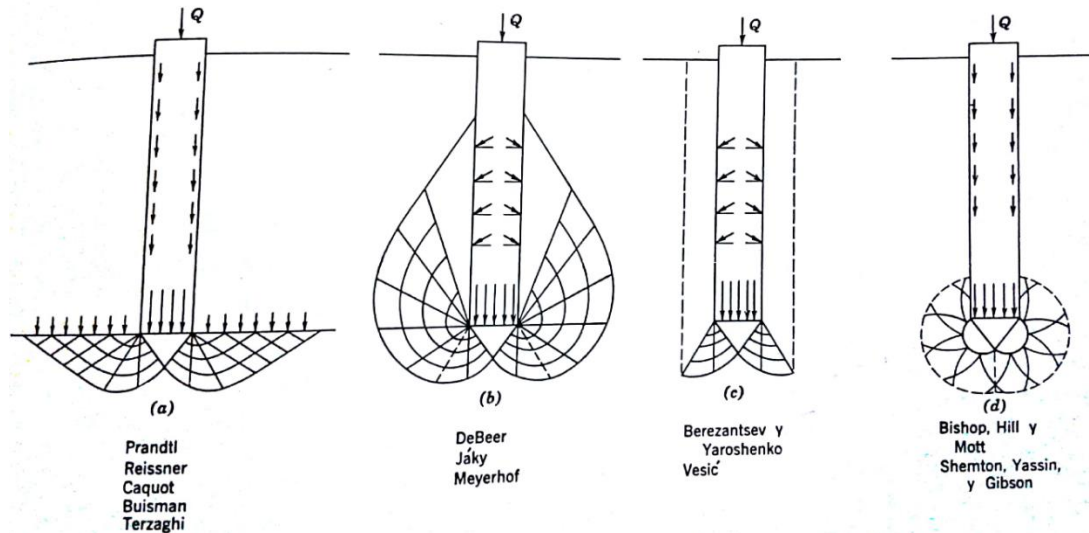


Figura 13. Formas de falla en la punta de un pilote.

Fuente: Lambe, W y Whitman, R “Mecánica de Suelos”, (1979), pág. 527.

Otra disparidad respecto a las superficiales es que según las opiniones de muchos autores los factores de carga son mucho mayores en este caso.

La resistencia de punta entonces se rige por la siguiente ecuación:

$$Q_{pu} = A_p * (\Delta q_s)u \quad \text{Ec. 9}$$

En donde

A_p = Área de la punta del pilote

$$(\Delta q_s)u = c * N_c + \frac{\gamma B N_\gamma}{2} + \gamma d N_q \quad \text{Ec. 10}$$

Quedando entonces

$$Q_{pu} = A_p * \left(c * N_c + \frac{\gamma B N_\gamma}{2} + \gamma d N_q \right) \quad \text{Ec. 11}$$

Es importante destacar que en suelos permeables, las sobrepresiones intersticiales originadas por la carga de una cimentación profunda se pueden disipar rápidamente; por tanto, existirán condiciones de drenaje. Mientras que, en suelos no permeables, las sobrepresiones intersticiales creadas al cargar una cimentación profunda pueden disiparse o no según el tipo de carga.

Bajo una carga permanente de larga duración, como la producida por el peso de una estructura, las sobrepresiones intersticiales pueden disiparse sin problemas; mientras que para una carga de corta duración, como la ejercida por el viento sobre una estructura dichas presiones no logran disiparse.

Para el caso de los suelos no permeables las condiciones de no drenaje dan lugar a la capacidad de carga mínima en suelos blandos cohesivos, por lo que el método razonable para calcular la resistencia de punta de pilotes en este caso es suponer la capacidad de carga sin drenaje a manera conservadora.

Sabiendo ya esto, se puede para cada tipo de suelo simplificar la ecuación de capacidad de punta siguiendo las recomendaciones de API RP 2A-WSD (2000), como se muestra a continuación:

1. En suelos permeables

Para el caso de suelos permeables como arenas en donde hay fricción y no existe la cohesión queda la siguiente ecuación:

$$Q_{pu} = A_p * \left(\frac{\gamma B N_\gamma}{2} + \gamma d N_q \right) \quad Ec. 12$$

Pero bien es cierto que el término $\frac{\gamma B N_\gamma}{2}$ es bastante pequeño respecto a $\gamma d N_q$, por lo que puede considerarse despreciable, y la ecuación queda de la siguiente forma

$$Q_{pu} = A_p * \gamma d N_q \quad Ec. 13$$

En donde γd representa al esfuerzo vertical efectivo de la zona de influencia de la punta del pilote, mientras que el factor de carga N_q , se extrae del siguiente gráfico dependiendo del ángulo de fricción representativo de la zona de influencia que a su vez depende de la forma de falla utilizada por cada autor.

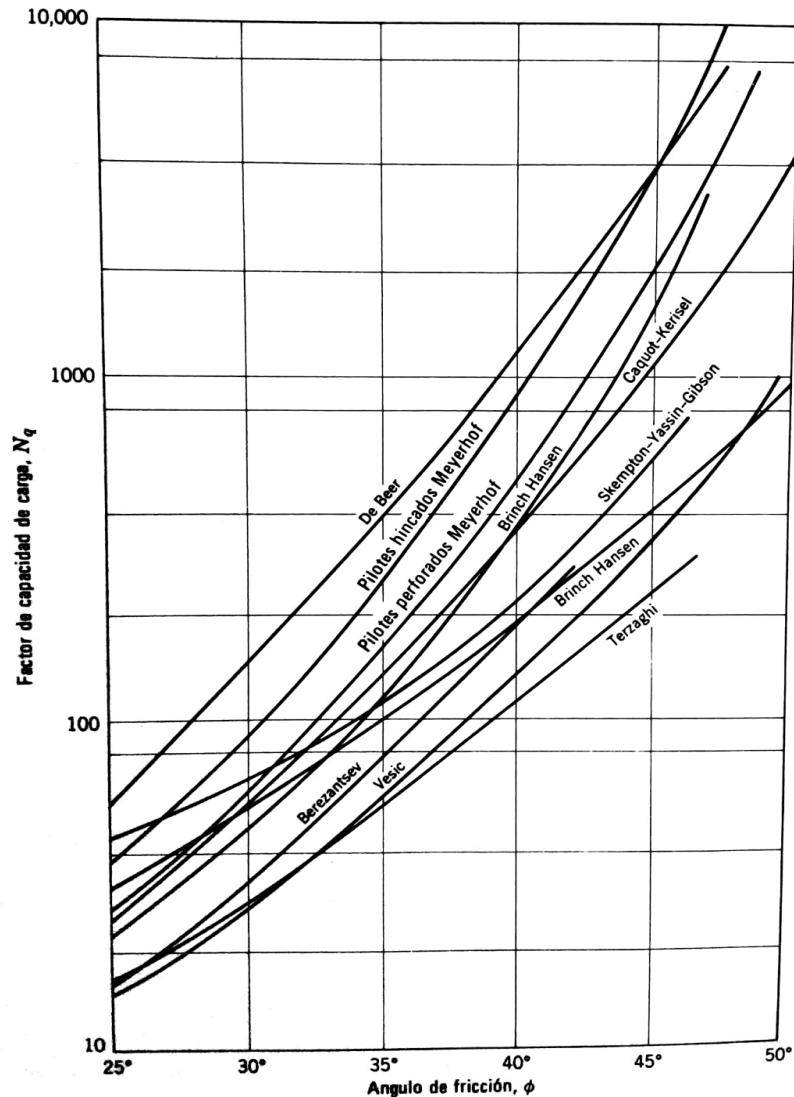


Figura 14. Factor de capacidad de carga N_q vs ángulo de fricción del suelo.

Fuente: Lambe, W y Whitman, R “Mecánica de Suelos”, (1979), pág. 526.

2. En suelos no permeables

En el caso de suelos no permeables como arcillas en donde no existe la fricción, sino que solo hay cohesión la ecuación queda de la siguiente forma:

$$Q_{pu} = A_p * 9C_u \quad \text{Ec. 14}$$

En donde al igual que en la resistencia por fuste,

C_u = Resistencia al corte no drenada en el punto en cuestión

Capacidad portante en arenas y arcillas

En resumen, la capacidad de carga de un pilote único es diferente en arenas y en arcillas, aunque depende de las mismas variables fuste y punta.

1. En suelos permeables con drenaje libre (Arenas)

$$Q_u = A_p * \gamma d N_q + (a_s) * \left(\sum \Delta L \right) * (K * \sigma_{vo} * \tan \phi) \quad \text{Ec. 15}$$

2. En suelos no permeables sin drenaje (Arcillas)

$$Q_u = A_p * (9 * C_u) + (a_s) * \left(\sum \Delta L \right) * (\alpha * C_u) \quad \text{Ec. 16}$$

Todo siguiendo las recomendaciones de API RP 2A-WSD (2000).

2.3.2 Pilotes según su forma de trabajo

En ciertas ocasiones dependiendo del tipo de perfil geotécnico que se tenga, se pueden encontrar pilotes que trabajen con una sola de estas dos componentes. A continuación, se pueden observar dos casos de lo indicado:

- Pilotes de fuste

Este tipo de pilotes es utilizado cuando no hay ningún estrato de buena capacidad portante en la cercanía de la superficie (más de 20m), por lo que se busca que la capacidad geotécnica del pilote se desarrolle por pura fricción lateral. Generalmente son de gran diámetro y son bastante alargados.

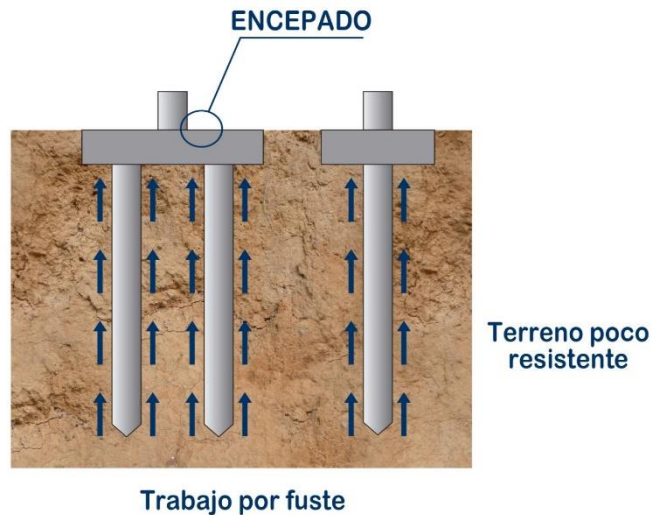


Figura 15. Pilotes de fuste.

Fuente. “Los pilotes”, Unicon, (2018).

Recuperado de: <http://www.unicon.com.pe/principal/noticias/noticia/los-pilotes/351>

- Pilotes de punta

Este tipo de pilotes se utiliza mucho cuando existe un muy buen estrato portante que se encuentra bastante cercano a la superficie y por lo tanto no vale la pena que el pilote alcance tanta longitud. En estos pilotes se debe cuidar mucho el asiento de la punta, ya que es lo que fundamentalmente trabaja más; normalmente se requiere un mayor número de pilotes para poder tomar la carga sin asentamientos excesivos para la estructura.

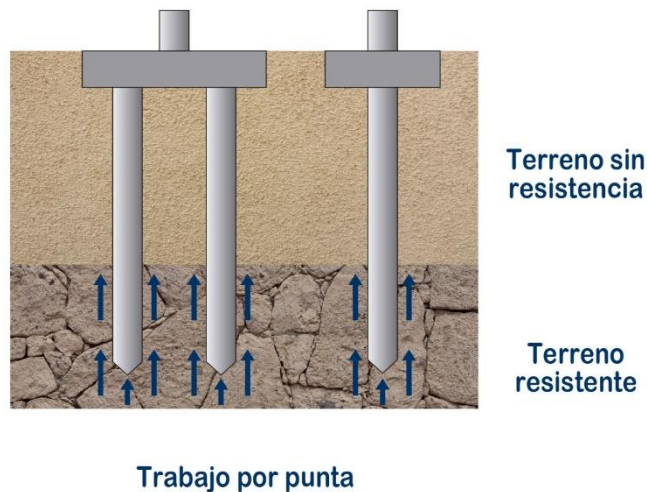


Figura 16. Pilotes de punta.

Fuente. “Los pilotes”, Unicon, (2018).

Recuperado de: <http://www.unicon.com.pe/principal/noticias/noticia/los-pilotes/351>

2.3.3 Desarrollo de la capacidad portante de un pilote

La capacidad portante de un pilote se compone como se explica en puntos anteriores de la capacidad de carga de la punta más la capacidad de carga del fuste. Para que estas dos componentes se desarrollen, es necesario que el pilote se desplace o se asiente a través del suelo, según lo demostrado por los investigadores Reese y O'Neill.

Estos investigadores comprobaron a través de ensayos de carga axial estáticos de una importante cantidad de pilotes, que ambas resistencias tanto de punta como de fuste se desarrollan a medida que ocurre el asentamiento sin importar el tipo de suelo que sea.

Adicionalmente, para el desarrollo de la capacidad de fricción o fuste se necesita un asentamiento de aproximadamente la décima parte del requerido para desarrollar la capacidad de punta.

Tal como se destaca en las figuras siguientes, quedo demostrado que la resistencia por fuste es la que se desarrolla en primer lugar cuando se carga un pilote (se empieza a formar a partir de asentamientos muy bajos), mientras que la resistencia de punta comienza a formarse a asentamientos muy elevados respecto al fuste.

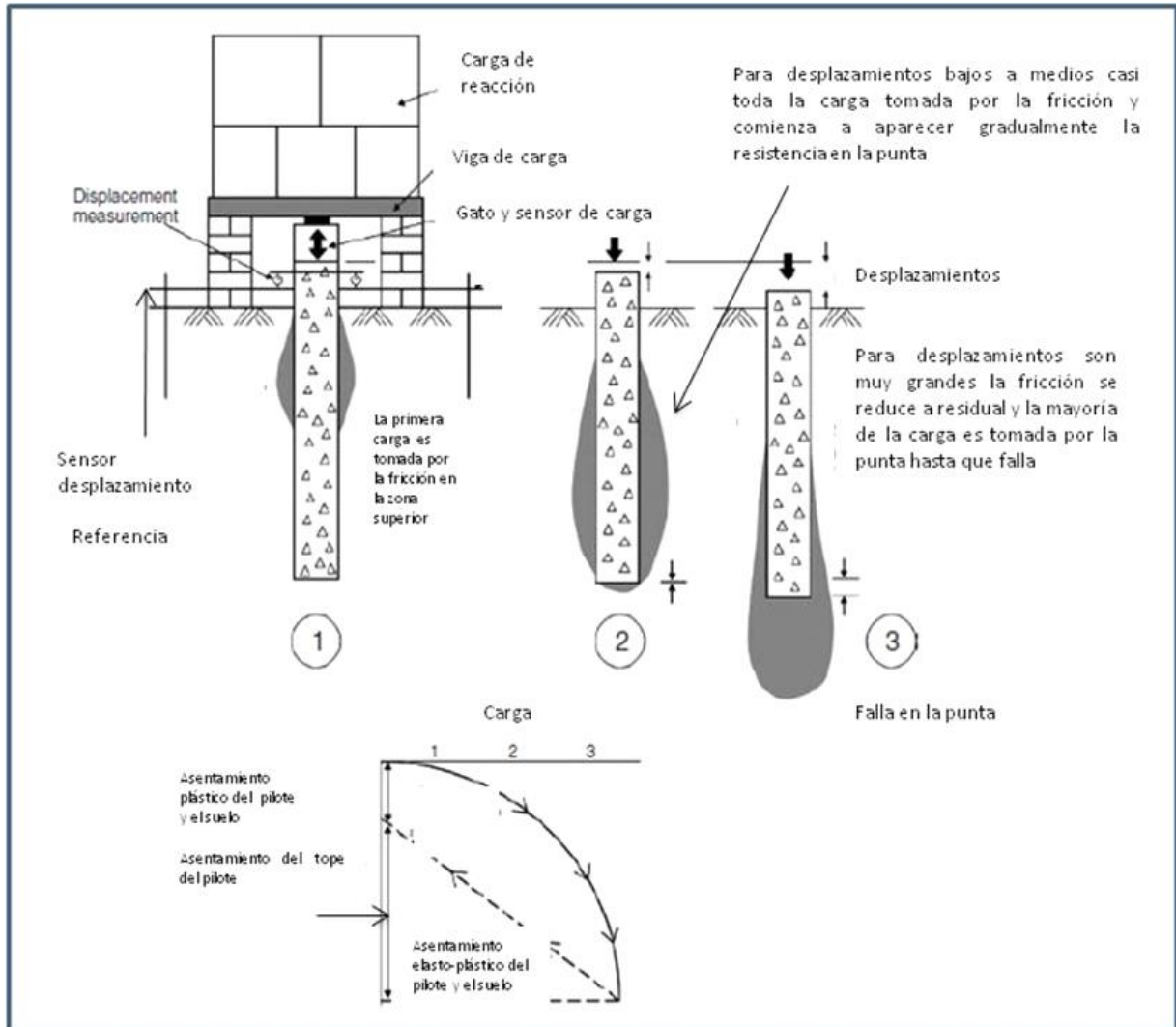


Figura 17. Interpretación esquemática de una prueba de carga estática sobre un pilote.

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

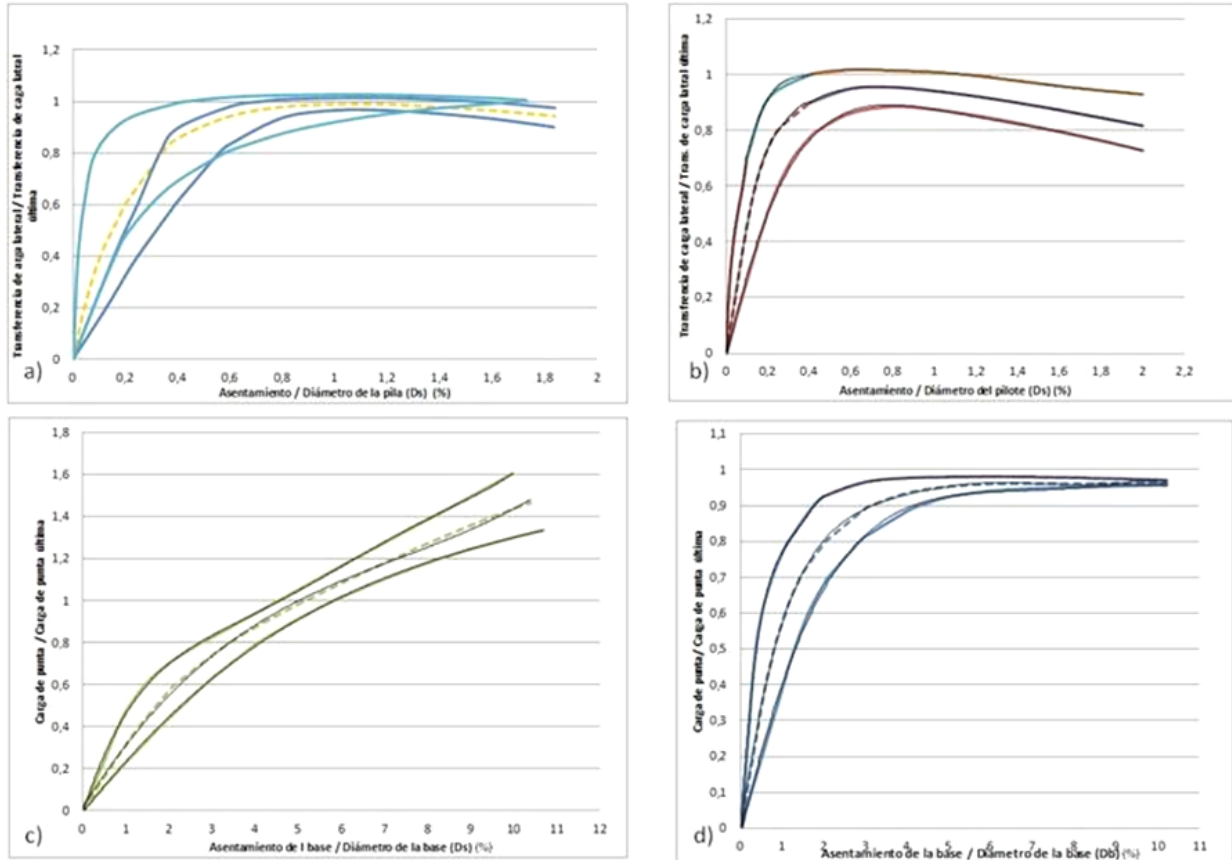


Figura 18. Curvas de capacidad vs asentamiento normalizadas propuestas por los investigadores Reese y O'Neill para suelos de arcilla y arenas.

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

Las curvas están normalizadas en el asentamiento respecto al diámetro del pilote y en las cargas como fracción de la carga teórica última esperada para la punta y el fuste respectivamente. Las curvas de la izquierda, son las propuestas para suelos arenosos y las de la derecha son las propuestas para suelos arcillosos; mientras que las superiores en cada caso, representan a la resistencia por fuste, y las inferiores a la resistencia por punta.

Se aprecia entonces como el modelo propuesto por Reese y O'Neill presenta como conclusiones que el comportamiento de un pilote a medida que toma carga tanto en arenas como en arcillas es muy similar, y además, que independientemente del tipo de suelo que se tenga, la resistencia por fuste se desarrolla con asentamientos respecto al diámetro del pilote mucho menores que la resistencia por punta.

Como se puede observar en las gráficas propuestas por los investigadores, los asentamientos respecto al diámetro del pilote tanto en arenas como en arcillas para que el pilote desarrolle toda su capacidad por fuste, varían entre el 0.4% y el 0.5%, mientras que para estos asentamientos normalizados solamente se ha desarrollado entre 10% a 20%, dependiendo de si el suelo es arcilloso o arenoso. Es por esto que es muy importante a la hora del diseño, utilizar factores de seguridad distintos para cada una de las cargas, que sean compatibles con el asunto; se debería utilizar un factor de 2 para el fuste y entre 3 y 5 para la punta para cumplir con esto.

Para contrastar este hecho, supóngase que el pilote en cuestión tiene un metro de diámetro; se tiene entonces que para que se desarrolle la capacidad por fuste completa debe ocurrir un asentamiento de unos 4.5mm, mientras que para que se desarrolle la capacidad de punta completamente el pilote se debe asentar 4cm para arenas y 3cm para arcillas. Debemos tener en cuenta que 4cm es un asentamiento excesivo para una estructura común, debido a que generalmente se diseñan para asentamientos máximos de una pulgada (2.50cm). Es por esto que se debe tener en cuenta mucho este aspecto de la resistencia por fuste antes que la de punta.

Se nota también como los modelos de cálculo tradicionales funcionan bastante bien para estimar la carga última de un pilote excepto para la carga de punta de arenas; es decir en la capacidad por punta de arenas no hay un tope de capacidad, siempre sigue creciendo por falta de claridad en el modelo de cálculo (no se describe bien el comportamiento).

Cabe destacar que este estudio es válido para cualquier pilote, ya sea hincado o vaciado en sitio, debido a que los investigadores hicieron ensayos en cantidad de pilotes en ambos tipos de suelo y todos ellos caen dentro del rango mostrado. Si se quiere trabajar con estas curvas, es recomendable utilizar las curvas de rango medio al inferior por motivos de seguridad. Se recomienda la lectura de la norma API RP 2A, en donde se toman estas curvas normalizadas para el cálculo de la capacidad de los pilotes.

A continuación, se muestran dichas curvas extraídas de la norma API RP 2A:

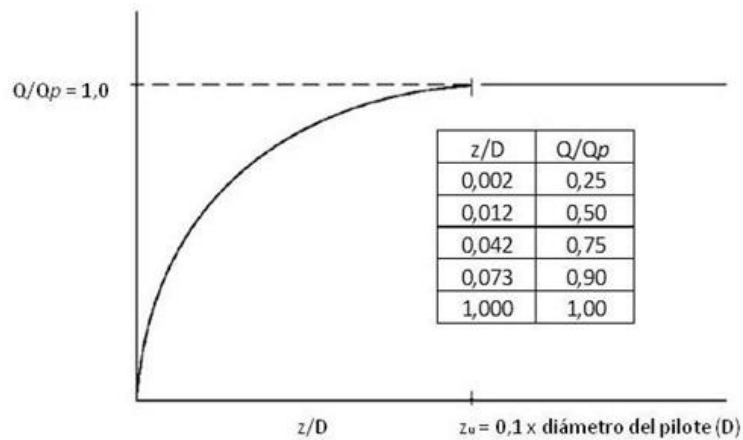


Figura 19. Curva de desplazamiento capacidad ($Q-z$) para punta de pilotes en arcillas y arenas.

Fuente: norma API RP 2- A.

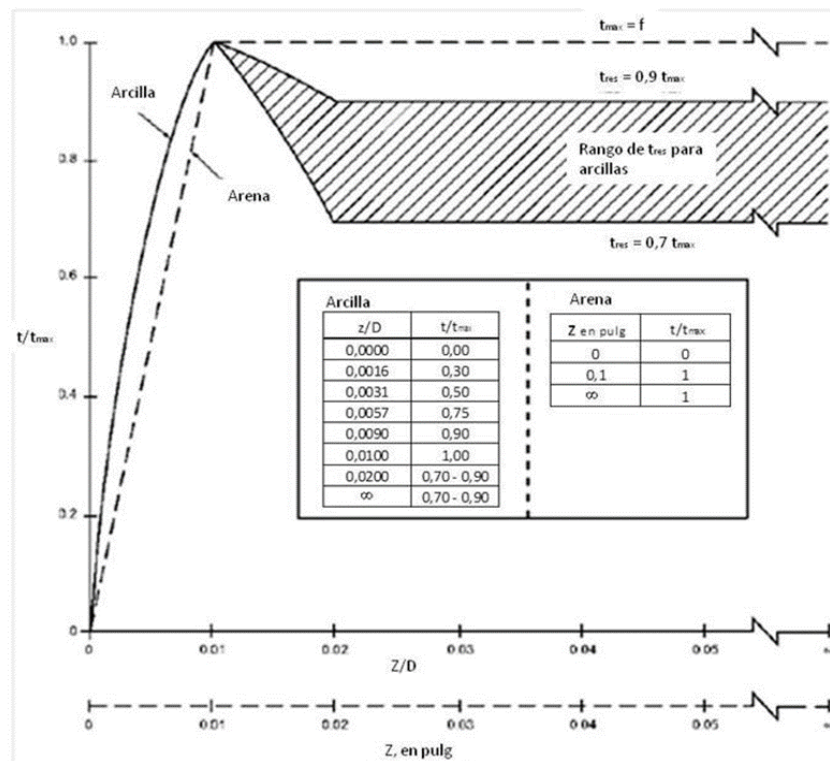


Figura 20. Curvas normalizadas de resistencia lateral con asentamiento para arenas y arcillas, denominadas, $t-z$.

Fuente: norma API RP 2- A.

Con el fin de demostrar este fenómeno, diversos investigadores han realizado ensayos de comprobación en campo mediante la utilización de celdas de carga incrustadas a lo largo del pilote, que miden la carga real aplicada en ese punto en específico. A continuación, se muestra un gráfico que describe un ensayo real con data de campo:

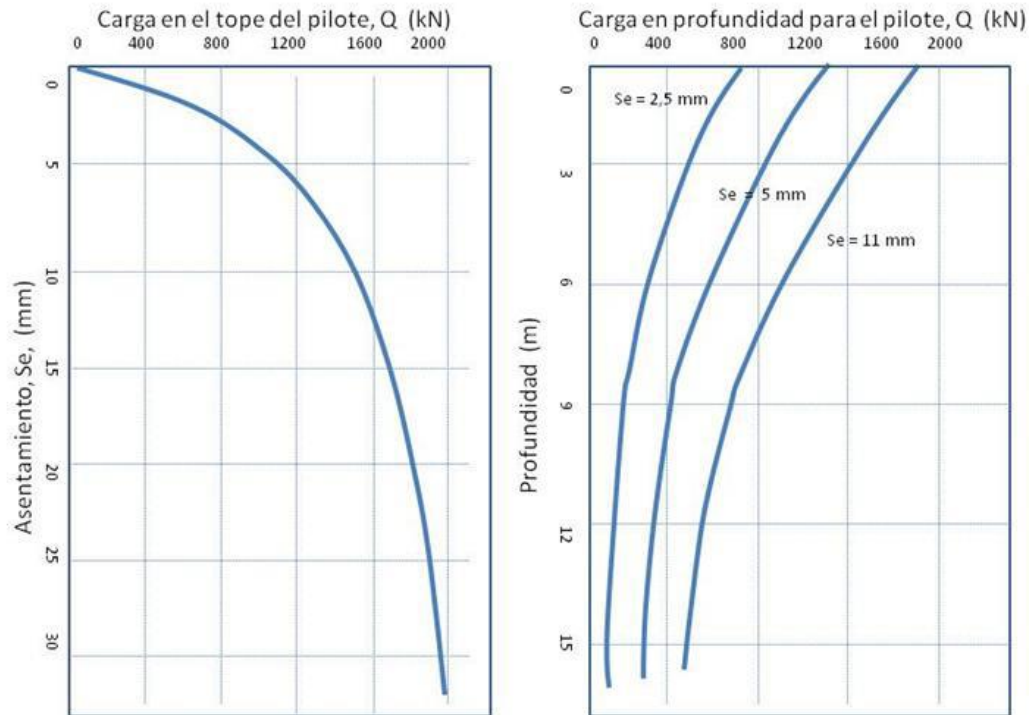


Figura 21. Prueba de carga estática con mediciones de a) Carga aplicada en tope vs Asentamiento y b) Carga transmitida a lo largo de la profundidad del pilote para varios asentamientos.

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

El ensayo en cuestión fue aplicado para un pilote de 90cm de diámetro construido en un perfil geotécnico de arena. Siguiendo entonces la teoría presentada por los investigadores Reese y O'Neill la carga de fuste debe desarrollarse completamente a un nivel de asentamiento de 4% del diámetro del pilote, es decir, 3.60mm.

Para una carga de 800 kN aplicada sobre el pilote, el asentamiento total es de 2.50mm; luego la carga transmitida a la punta captada por la celda es de unos 100 kN, lo cual quiere decir que el fuste ha desarrollado la diferencia respectiva de 700 kN. Vemos que a este nivel de asentamiento aún no se ha desarrollado la resistencia por fuste completa según la teoría propuesta.

Para 5mm de asentamiento la carga aplicada es de 1150 kN, la transmitida a la punta es de unos 300 kN, por lo que la resistencia de fuste total es de 850 kN. Esto coincide con la teoría, ya que el fuste debía crecer un tanto más para desarrollarse por completo, y a este nivel ya está al 100%.

Para 11mm de asentamiento la carga aplicada es de 1450 kN, la transmitida a la punta es de unos 500 kN, por lo que la resistencia de fuste es de 950 kN. Se nota que aumenta un poco, pero esto puede deberse a fallas en las celdas, que no son 100% precisas.

2.3.4 Factores que afectan al desarrollo de la capacidad portante de un pilote

Los factores más importantes que afectan la capacidad portante de un pilote excavado, tienen estrecha relación con la forma que se desarrolla la capacidad del mismo a medida que se asienta en el terreno. Estos son:

- Adherencia de las paredes al fuste del pilote

Como se aprecia en los puntos anteriores, el fuste del pilote desarrolla resistencia por fricción al desplazarse a través del suelo, y con asentamientos muy leves ya se encuentra totalmente desarrollado.

Ahora bien, esto se cumple siempre y cuando al ejecutar la construcción del pilote se realice un lavado de los lodos contaminados en el pozo, para asegurar de esta forma que no exista formación de películas de lodo en el perímetro del fuste, que como consecuencia directa pueda disminuir considerablemente la adherencia del pilote a las paredes del agujero, tanto en longitudes parciales o en la totalidad de la profundidad del elemento.

Cabe destacar entonces, que la no adherencia del fuste a las paredes ocasiona que la capacidad portante del pilote que fue calculada en el diseño no se desarrolle para asentamientos pequeños sino para grandes asentamientos, que no es lo deseado.

- Asiento de la punta del pilote en el terreno

La punta del pilote desarrolla la capacidad de carga desplazando el suelo y creando mecanismos de traba en forma de bulbo contra la misma estructura del pilote. En el diseño del pilote, se toma la contribución de la punta para el asentamiento máximo permisible de la estructura, generalmente una pulgada.

Ahora bien, esta resistencia de punta puede desarrollarse a asentamientos mucho más grandes, por los asientos blandos de material arenoso que pueden formarse, si durante la construcción del pilote se descuidan estos aspectos:

- El lavado del pozo de los lodos contaminados con material de la excavación, sobre todo si es material arenoso con arenas gruesas a medias.

- Limpieza de punta al finalizar la excavación, cuando se sospeche maltrato de paredes por la inserción del acero y cuando la excavación no sea vaciada en un lapso corto de tiempo ya que se facilita la sedimentación).

Si no se tienen en cuenta estos factores, el asentamiento de proyecto no será el necesario para alcanzar la capacidad sino uno mucho mayor, lo cual no es deseable.

- Integridad estructural del pilote

Como se ha discutido en los puntos anteriores, si el pilote no se encuentra totalmente integro la capacidad para la cual fue diseñado se desarrollará para asentamientos mucho mayores a los deseados, ya que las ecuaciones de cálculo de esto se fundamentan en un pilote que tiene su fuste sin interrupciones y una punta bien formada.

Como el fuste es el que más participa en asentamientos pequeños, y además es más afectado por las malformaciones que la punta por la formación de cavernas, oquedades, etc., se debe tener mucho cuidado en los aspectos que hacen que estas malformaciones ocurran.

2.3.5 Integridad estructural de un pilote

Se refiere a la uniformidad de su sección transversal a lo largo de toda su estructura longitudinal, es decir, que el pilote no tenga oquedades o cavernas; Así como también al buen contacto con el terreno en la punta y en las paredes.

2.3.6 Factores que afectan la integridad estructural de un pilote

La integridad estructural de un pilote excavado se ve afectada por diversos factores de inspección y ejecución en obra; lo más destacados que se pueden mencionar, según la bibliografía consultada son:

1. Verticalidad del hoyo

En muchas ocasiones se puede presentar este inconveniente, en donde el hoyo excavado no está totalmente vertical, por defectos presentes en el equipo perforador, errores en el manejo por parte del operador o mal chequeo de la verticalidad durante la excavación.

Este error ocasiona que luego a la hora de insertar el acero, el mismo genere: derrumbes por el contacto con las paredes del hoyo, que no se cumpla con el recubrimiento requerido para evitar la corrosión del acero, y además que se produzcan esfuerzos adicionales para los cuales el pilote no fue diseñado.

Es por esto que se recomienda como buena práctica, chequear los equipos y chequear la verticalidad de la perforadora con herramientas de nivel antes de empezar a excavar. Luego verificar metro a metro que efectivamente la verticalidad marche bien.



Figura 22. Hoyo completamente vertical ya armado.

Fuente: Mullins y Ashmawy, “Factors affecting anomaly formation in drilled shafts”, Marzo 2005.

2. Lavado de lodos presentes en el pozo

Cuando las perforaciones requieren la utilización de lodos de cualquier tipo, es un problema muy común que se presente una contaminación del líquido a lo largo de la perforación por aspectos inevitables durante el proceso. Esta contaminación de los lodos, puede ser riesgosa cuando no es tomado en cuenta el hecho de que al terminar de realizar las labores de perforación se debe limpiarlos, haciéndolos pasar por mecanismos de recirculación que de alguna forma eliminen los contenidos de arena presentes, para así eliminar el riesgo de sedimentación de material hacia la punta.

Las normas establecen que el contenido de arena en la concentración del lodo sea máximo de 4%. Ing. Echezuría, Heriberto, en apuntes sobre “*Control de calidad y recomendaciones constructivas en la ejecución de cimentaciones profundas*” ha demostrado mediante ensayos de laboratorio rigurosos en “*Variación de la viscosidad y la calidad del lodo utilizado para la construcción de pilotes, considerando la cantidad de sólidos suspendidos*” Parisca, Laurenis, que esto solamente aplica para el caso de arenas gruesas a medias, ya que son las que pueden de alguna forma sedimentar a través del lodo, mientras que el contenido de arenas medias a finas es beneficioso para el lodo, ya que ayuda aumentar su viscosidad y disminuye la sedimentación.

Si bien es cierto que este problema puede traer complicaciones al asiento del pilote en la punta, también puede generar que el lodo se densifique, y a la hora del vaciado del concreto se haga más difícil su expulsión por diferencia de densidades, haciendo que se formen en ciertos casos cavernas que afectan la integridad estructural.

Es también muy importante destacar que el hecho de que el lodo no tenga una calidad adecuada favorecería la formación de películas de lodo alrededor de la pared del hoyo, que disminuiría su capacidad portante por la afectación del coeficiente de fricción entre el concreto-suelo.

3. Verticalidad de la cajuela de acero

Un error muy común es el de insertar la cajuela del acero de refuerzo del pilote sin haber chequeado la verticalidad total del conjunto antes de hacerla descender por el agujero ya abierto. Si el elemento no está totalmente vertical, entonces ello ocasiona contacto directo con las paredes de la excavación, y por ende con el movimiento descendente se generan derrumbes que pueden estrangular el pilote.

Es por esto que se recomienda como buena práctica antes de empezar a descender la cajuela de acero en el agujero, asegurarse de la verticalidad total midiendo con herramientas de nivel ortogonales en el perímetro de la cajuela, y con ello realizar las correcciones respectivas para poder comenzar el descenso.



Figura 23. Colocación de cajuela de acero.

Fuente. “Ingeniería civil”, Blog Ingeniería civil, (2007).

Recuperado de: <http://ingecivilcusco.blogspot.com/2009/06/pilotes.html>



Figura 24. Colocación de cajuela de acero con rodillos de restricción.

Fuente. “Pilote CPI-8”, Pilotes y obras, (2013).

Recuperado de: <http://www.pilotesyobras.com/pilotes-CPI8.asp>

4. Clima

El clima es un factor incontrolable, pero de mucho cuidado, debido a que los pilotes ejecutados con malas condiciones se ven afectados por problemas de derrumbes, lodos, inundaciones, entre otros problemas.

La condición climática más importante a ser tomada en cuenta es el viento fuerte, ya que, a la hora de insertar el acero, por más cuidado e inspección que se tenga es inevitable que la cajuela se mueva y empiece el roce con las paredes del hoyo, produciéndose derrumbes indeseados.

Es por esto que se recomienda que durante la ocurrencia de vientos fuertes no se inserte la cajuela de acero hasta que este disminuya su intensidad. Esto a menos que en la zona siempre existan vientos fuertes, en donde se deben tomar medidas especiales en el descenso o en su defecto cambiar el pilote al de tipo hincado para evitar problemas estructurales.

Es también de buena práctica, que durante las precipitaciones se paraliquen momentáneamente los trabajos; de igual manera siempre existe la posibilidad de que aun tomando la recomendación ocurran inundaciones y formación de lodos dentro de los pilotes debido a su naturaleza de ser puntos bajos (bateas).

5. Asentamiento del concreto

El asentamiento del concreto durante el vaciado del pilote es un factor que debe chequearse, debido a que de ser muy poco hace inconstruible el pilote porque el concreto queda atrapado y no pasa a través del acero de la cajuela ni por la manguera o cono de vaciado, es decir, quedan oquedades que ni con vibrado pueden ser llenadas. Ya que el asentamiento se va perdiendo a lo largo del vaciado del pilote, se debe estar chequeando a lo largo de todo el hoyo con los ensayos respectivos.

A continuación, se presentan fallas por problemas con el asentamiento del concreto:



Figura 25. Falla por asentamiento del concreto.

Fuente: Mullins y Ashmawy, “Factors affecting anomaly formation in drilled shafts”, Marzo 2005.

Para evitar este problema se debe garantizar un asentamiento de concreto en todo momento de entre siete (7) a nueve (9) pulgadas, según las investigaciones realizadas por Mullins y Ashmawy, “Factors affecting anomaly formation in drilled shafts”, Marzo 2005.

6. Vibrado del concreto

Se debe garantizar un buen vibrado en el concreto del pilote mediante la utilización del método “Tremie” de vaciado, en donde con el movimiento de la tubería, se logra la vibración necesaria para que escapen el aire de la mezcla y no queden oquedades o cavernas indeseadas. En caso de no prestar atención al vibrado, se producen problemas de sección de concreto que pueden afectar la integridad, que dependiendo de la gravedad pueden resultar hasta en el rechazo del pilote.



Figura 26. Falla por falta de vibrado en el concreto.

Fuente. “Cuidados del hormigón”, Enrique Alario Catalá, (2014).

Recuperado de: <https://enriquealario.com/la-importancia-de-un-buen-vibrado-del-hormigon/>

7. Tamaño máximo de agregado vs separación de acero

El tamaño máximo del agregado utilizado para la mezcla de concreto de los pilotes, debe ser según las normas respectivas, por lo menos un tercio menor a la separación existente entre el acero para que no se presenten inconvenientes a la hora del vaciado.

Si no se cumple correctamente esta condición, es bastante probable que la mezcla de concreto no logre penetrar a través de la cajuela de acero de refuerzo en su totalidad, es decir con todos los componentes, sino que solo logra penetrar una fracción de la pasta o mortero. Al esto suceder se generan problemas de: formación de cavernas, y falta de recubrimiento ya que el concreto no logra acceder a través de la cajuela de refuerzo

Este problema es bastante común en casos en donde por alguna razón se debe sustituir el acero de refuerzo del pilote por otro de menor diámetro, y por tanto se modifica la separación entre las piezas a otra diferente con la que fue diseñada la mezcla en un principio. Lo que sucede es que no se presta atención a que la mezcla fue diseñada para tener un tamaño máximo de agregado respetando la anterior separación, y no se calcula nuevamente cual debe ser el tamaño máximo modificado, sino que trabajan con el mismo. Es por esto que se debe tener sumo cuidado a la hora de realizar un cambio de los diámetros del acero de refuerzo en caso de no existir la disponibilidad en el mercado del diámetro utilizado en el diseño.

8. Vaciado

El método de vaciado es un factor muy importante que afecta la integridad estructural de un pilote, ya que de no ser el correcto afecta enormemente la estructura. Existen dos formas de vaciado:

- Vaciado desde el tope del pilote

En este método se coloca un embudo en la parte superior del agujero, y el concreto es arrojado en caída libre sin ningún tipo de control a lo largo de todo el pilote durante todo el vaciado. Esta forma incorrecta de vaciado no debe utilizarse jamás, ya que genera graves problemas de disgregación de la mezcla de concreto, golpes abruptos que ocasionan derrumbes, formación de cavernas, etc.

- Vaciado desde el fondo del pilote

En este método de vaciado se coloca un embudo en la parte superior del agujero conectado a una tubería que se conoce como “tremie”. Alternativamente, se puede utilizar una bomba cuya manguera alcance el fondo del pilote. En estos casos el concreto es conducido a través de la tubería, evitando así la disgregación de material, mezclas y golpes abruptos y disminuyendo la formación de cavernas.

Este es el método de vaciado que debe utilizarse; para mayor información se recomienda al lector leer en el presente capítulo el apartado 2.3.7

Todos estos errores pueden suceder durante la ejecución de un pilote, es decir, que evitándolos cumpliendo con los requisitos adecuados, estaremos disminuyendo de forma considerable la probabilidad de que los pilotes fallen por integridad estructural. No por ello se debe dejar de un lado la necesaria práctica de realizar las correspondientes pruebas de integridad estructural “PIT” correspondientes a un buen “QC”.

Cabe destacar que para un pilote del tipo hincado no existen mayores problemas de integridad estructural si el pilote está bien diseñado para soportar las cargas de hincado en el suelo y las cargas producto del izamiento y transporte.

2.3.7 Método Tremie para el vaciado de pilotes

Para el vaciado de pilotes en los que el agua está presente ya sea porque el nivel freático es elevado o porque la infraestructura es submarina se necesita del método conocido como “Tremie” o Tubo-Embudo para poder lograr el vaciado del concreto a través del agua.

El método tremie consiste en el llenado de concreto del pilote mediante la utilización de flujo inverso, es decir, a medida que el concreto va llenando el hoyo, el agua presente va elevándose o escapándose por la diferencia de pesos específicos o densidades.

Esto se logra mediante la utilización de una tolva en donde es descargado el concreto en forma continua, la cual está conectada a una tubería que recibe el nombre de “Tremie”, en donde la misma es la encargada de conducir la mezcla a lo largo del pilote.

El concreto debe tener un asentamiento de al menos siete (7) pulgadas para permitir la correcta compactación o vibrado y además evitar atascos en la tubería tremie. Se debe tener en cuenta que el extremo inferior del tremie siempre debe estar sumergido a lo largo del vaciado en la mezcla de concreto por lo menos 50cm para garantizar que no se produzcan fenómenos de segregación; es decir el tremie va ascendiendo a medida que el vaciado avanza y se va colocando más concreto.

La fase más crítica de este modelo de vaciado es el inicio, debido a que por la presencia de agua es complicado el paso de concreto. Es muy común en la práctica entonces antes de iniciar el vaciado según, Mullins y Ashmawy, “Factors affecting anomaly formation in drilled shafts”, la colocación un tapón al final del tremie, así como también rellenarlo completamente de un mortero muy rico en cemento con fines de facilitar el flujo del concreto y evitar pérdidas de cemento en el vaciado.

Con esto se asegura que el flujo de concreto al inicio del vaciado no sea tan violento y no haya posibilidades de que ocurran derrumbes o taponamientos de la tubería por la mezcla rápida que se produce en el fondo.

Se debe garantizar un vaciado lo más continuo posible para evitar endurecimientos que puedan dificultar la elevación de la tubería. Por esto es recomendable que las interrupciones durante el vaciado no superen los 30min para garantizar un flujo de concreto de por lo menos 40 m³/hr.

Cabe destacar también por último que antes de retirar el tremie completamente, se debe verter suficiente concreto para desplazar toda el agua y el concreto diluido.

A continuación, se muestran esquemas de la utilización del método tremie:

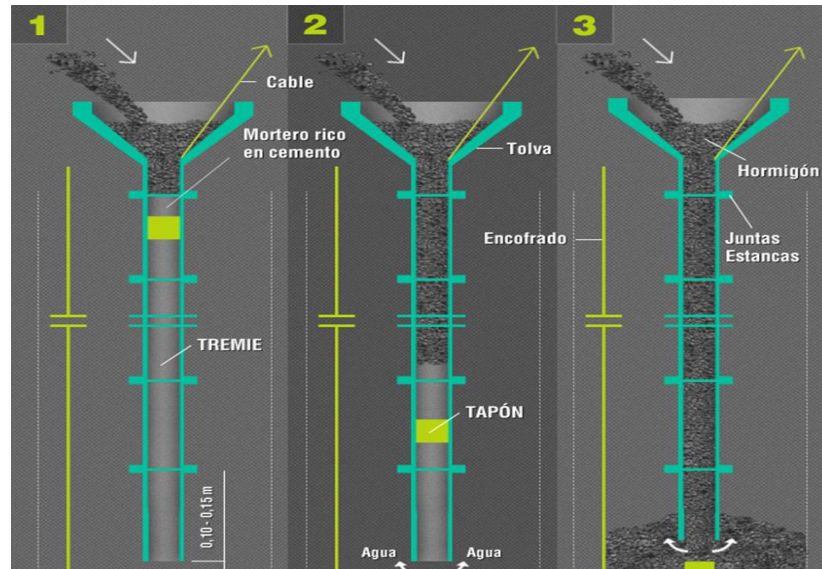


Figura 27. Sistema de tremie con tapón.

Fuente. “El concreto tremie, un sistema de colocación”, Karina Zambrano, (2011). Recuperado de: <http://blog.360gradosenconcreto.com/el-concreto-tremie-un-sistema-de-colocacion/>

Funciona introduciendo el tremie relleno de mortero rico en cemento con un tapón al final para y separándolo de 10 a 15 cm el suelo para permitir el desalojo del agua y lodos presentes, para luego empezar a colocar el concreto que hace que el tapón de bola escape y empiece a fluir el concreto por el hoyo. Luego se sigue el procedimiento indicado anteriormente.

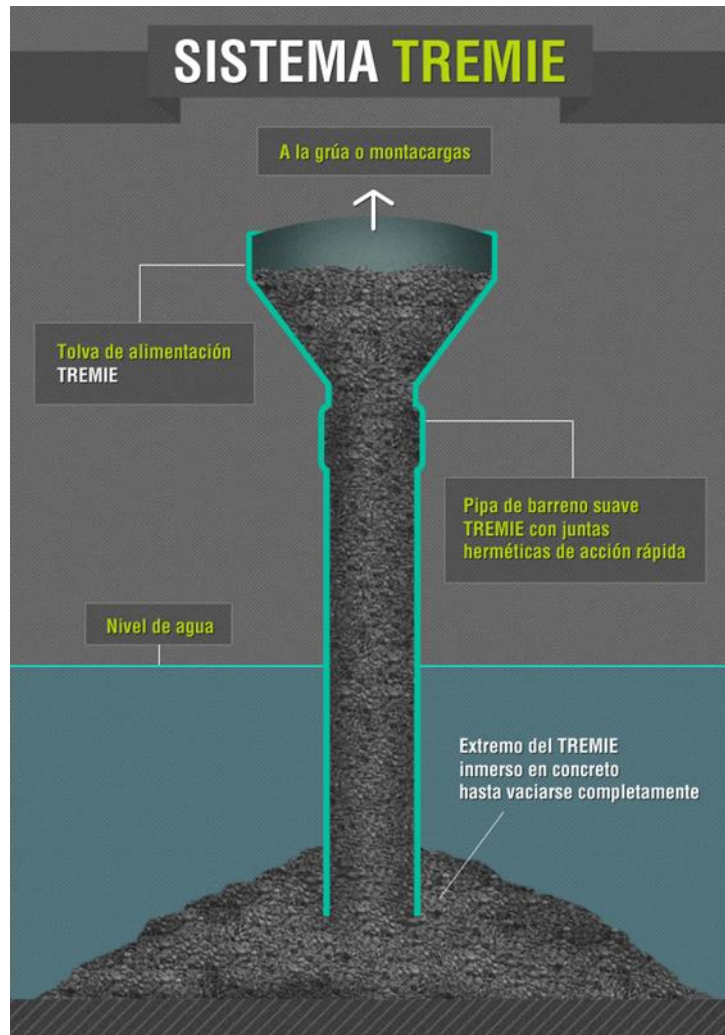


Figura 28. Detalle para el vaciado.

Fuente. “El concreto tremie, un sistema de colocación”, Karina Zambrano, (2011). Recuperado de: <http://blog.360gradosenconcreto.com/el-concreto-tremie-un-sistema-de-colocacion/>

Al comenzar el vaciado una vez que el tapón es liberado se debe verter suficiente concreto como para que la manguera tremie quede dentro de la mezcla por lo menos 50cm antes de comenzar con el ascenso progresivo.

2.3.8 Otros factores que afectan la correcta construcción de un pilote

Existen diversos factores tanto de proyecto como de campo que afectan de cierta manera la ejecución de un pilote, algunos de ellos son los siguientes:

1. Poca uniformidad

Muchos diseñadores de pilotes centran toda su atención en el cálculo de la capacidad portante del pilote para que este soporte las cargas que sean necesarias, dejando muchas

veces de un lado la realización de un análisis, tanto económico como de constructibilidad que incluya tanto la viabilidad como la facilidad de construcción.

Para que esto no ocurra es muy importante que la empresa a cargo del diseño y la encargada de la construcción de los pilotes tengan la suficiente interacción, y logren llegar a un acuerdo en donde se consideren todos los factores tanto de diseño como los relacionados a las actividades propias de la construcción.

En la mayoría de los casos, los diseñadores piensan que por cambiar la longitud de los pilotes y hacerla ligeramente mayor a lo requerido por cálculo es mucho más costoso para el propietario, pero eso no es cierto ya que por lo general es mucho más el dinero que se gasta por la pérdida de la eficiencia en la velocidad de ejecución en obra, debido a la pérdida de tiempo por estar ajustando las máquinas perforadoras a diferentes longitudes, diámetros y confeccionando diferentes cajuelas de acero en cada pilote.

Además de la pérdida de tiempo por los factores de ajuste, es de hacer notar también que pueden ocurrir errores en estos cambios que ocasionen más retraso todavía influyendo directamente sobre el costo de la obra.

Lo más recomendable para evitar este problema, es tratar en fase de proyecto de que los pilotes del lote sean lo más uniformes posibles en cuanto a sección, longitud y acero de refuerzo, para así evitar confusiones en campo a los operadores de las maquinarias y demás trabajadores. Para esto la empresa constructora debe realizar un análisis económico-constructivo con base en su experiencia a lo largo de los años para poder definir las dimensiones de los pilotes que cumplan tanto con la capacidad portante que deben tener como con los aspectos económicos.

En caso de que el análisis económico arroje como resultado, que no es muy conveniente la uniformización total o parcial, la empresa constructora debe contar con la suficiente inspección de obra y además alertar debidamente a las cuadrillas de campo para que estén al tanto de las variaciones y realicen los ajustes necesarios.

A continuación, se muestra un perfil ideal de pilotes homogeneizados para mayor factibilidad constructiva y económica:

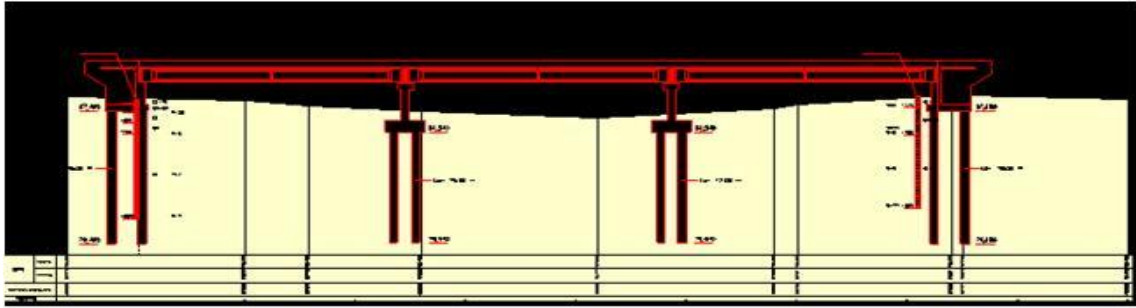


Figura 29. Perfil con pilotes que han sido homogeneizados a una misma profundidad.

Fuente: apuntes de Ing. Heriberto Echezuría, QA-QC para fundaciones profundas.

2. Topógrafos sin experiencia

Es muy común que los topógrafos se confíen a ciegas del primer replanteo que realizan, lo cual a veces es bastante arriesgado ya que generalmente ocurren equivocaciones que traen como consecuencia problemas de interferencias difíciles de resolver o inclusive demoliciones innecesarias.

Es por esto que es recomendable que el topógrafo ejecute dos actividades independientes totalmente una de otra de replanteo y levantamiento, es decir, en una visita debe replantear todo en campo tal como está en los planos con sus respectivas coordenadas; mientras que en otra visita completamente aparte debe levantar las coordenadas del replanteo que realizó anteriormente sin llevar las libretas que había utilizado.

Una vez hecho este levantamiento debe llevar dichas coordenadas a un plano nuevo y superponerlo con el plano original que utilizó para el replanteo la ubicación de todos los pilotes debe coincidir perfectamente ya que de no ser así hay algún problema que debe ser corregido.

3. Mala inspección

Al no tener la inspección necesaria en la obra se pasan cosas por alto en la ejecución de los pilotes que afectan la calidad de los mismos gracias a esta falta de firmeza por parte de los inspectores en el chequeo de las labores constructivas. Esto sucede cuando se tiene ingenieros residentes e ingenieros inspectores que evaden sus labores diarias de control de obra e inspección de ejecución.

4. Poca experiencia y mano de obra no calificada

Los operadores de maquinaria de perforación o hincado deben contar con la suficiente preparación en base a experiencias anteriores para disminuir errores de verticalidad del agujero, longitud deseada del pilote, sección, etc. Ello evita retrasos e inconvenientes innecesarios en la construcción de los pilotes.

También se debe contar con personal que sepa realizar la inserción del acero de la manera adecuada aun cuando exista la participación del viento, además de personas que sepan utilizar la manguera del tremie durante el vaciado para su correcto desempeño.

5. Maquinaria defectuosa

Los equipos de perforación de pilotes por el tipo de trabajo que realizan se desgastan muy a menudo y comienzan a tener problemas de vibraciones o movimientos no deseados. Estos pueden repararse repotenciando las maquinas nuevamente o en su defecto reemplazándolas totalmente.

Si no se cuenta con una maquinaria precisa es muy probable que el operador a pesar de tratar de controlarla en base a su experiencia falle en el intento, produciéndose así problemas en la integridad estructural del pilote por errores de excavación, inserción de acero, etc.

6. Condiciones anómalas en el perfil geotécnico no reportadas por el estudio de suelos

Existen ciertas ocasiones en donde se presentan condiciones anómalas que no son reportadas por los estudios de suelos correspondientes y por lo tanto afectan notablemente la forma de construcción de un pilote por este estar programado para hacerse de otra forma diferente a la realmente presente en campo.

Un buen ejemplo seria a la hora del hincado de un pilote toparse con una roca muy dura que no estaba prevista y por tanto no se puede atravesar con el pilote diseñado, debe modificarse el diseño y ello involucra retrasos innecesarios. Otro ejemplo seria conseguir agua de nivel freático en una perforación de un pilote cuando no estaba prevista la utilización de lodos, ello afecta sensiblemente la construcción del pilote.

2.3.9 Pruebas De Energía

Existen diferentes pruebas para verificar tanto la capacidad portante de un pilote, como de su integridad estructural, estas son: estáticas y dinámicas.

Las pruebas estáticas son siempre destructivas, usualmente para este tipo de ensayo se construye un pilote cercano a la obra para ensayarlo; después de la perturbación ocasionada en el suelo, el tiempo de reacomodo y asentamiento de sus partículas varía

entre 1 a 3 meses dependiendo del perfil geotécnico. Logrado este tiempo, se alcanza el “set up time”, y es posible realizar la prueba estática.

Para lograr transmitir las cargas correctamente existen distintos arreglos, siempre con vigas de reacción, cilindros hidráulicos y dispositivos para registrar los asentamientos, todos los arreglos cumplen la función de transmitir correctamente las cargas necesarias.



Figura 30. Prueba estática para estimar la capacidad portante.

Fuente. “Pruebas de carga estática (SLT) de pilotes”, CFT & Asociados, S.L, (2013).
Recuperado de: http://fernandeztadeo.com/WordPress/?page_id=1455

De igual manera para una prueba dinámica el tiempo en el cual el suelo alcanza el equilibrio es de 1 a 3 meses. La prueba dinámica nos permite estimar:

Sin desplazamiento: la integridad del pilote, es decir, si presenta oquedades o cavernas que afecten su capacidad anteriormente explicado como ensayo “PIT” en el apartado 2.3.10, también conocida como prueba de muy baja energía.

Con desplazamiento: también llamada prueba de baja energía donde por medio de desplazamiento del sistema pilote se desarrolla la fuerza de fricción y la carga de punta, desplegándose así la capacidad portante de un pilote explicado en apartado 2.3.11.



Figura 31. Prueba dinámica para estimar la capacidad portante.

Fuente. “Technological challenge in Portugal”, StressWave, (2008).

Recuperado de: <http://www.civil.ist.utl.pt/sw2008/invitation4.htm>

2.3.10 Prueba de integridad estructural de pilotes

La integridad estructural de un pilote es la base fundamental para su correcto desempeño y funcionamiento como fundación de una superestructura, es decir, de esto depende que el mismo desarrolle su capacidad portante para la cual fue diseñado. Para evaluar esto existen pruebas de integridad a las que comúnmente se les conoce como PIT o “Pile Integrity Test” por sus siglas en inglés.

Las pruebas PIT pueden ser desarrolladas de dos maneras diferentes, desde el tope del pilote, o por el fuste con tubos que se dejan embutidos en el vaciado dentro del pilote. Desde el tope del pilote se ejecutan con ondas de compresión, mientras que por los laterales puede ser mediante ondas de compresión u ondas de corte.

Ambas pruebas se fundamentan en el tiempo de viaje de una onda a través del pilote para el establecimiento de la calidad del mismo. Las pruebas son realizadas en la mayoría de los casos desde el tope del pilote, por lo que será el ensayo en el que se hará énfasis con detalle, ya que será el que se utilizará.

La prueba de integridad estructural realizada desde el tope del pilote consiste en golpear el pilote en la parte superior con muy baja energía (Golpes de mandarina común) en todo el perímetro del mismo, y registrar el tiempo de impacto, luego del impacto se

espera a que la onda viaje y se refleje nuevamente en el tope del pilote, en donde es captada por geófonos receptores que marcan el tiempo de llegada.

Una vez conocido el tiempo de viaje dentro del pilote o “Tiempo Real” se procede a calcular el “Tiempo Teórico” o tiempo que debería de llevar el pase de la onda por el pilote teniendo en cuenta tanto la longitud del pilote como la velocidad de viaje de las ondas de compresión dentro del concreto, que según estudios realizados de buena base durante mucho tiempo afirman que la velocidad de las ondas de compresión a través del concreto es de 4000m/s para concretos con $f'c$ entre 250 y 350kgf/cm² (Es decir en casi todos los concretos de edificaciones comunes) .

Comparando estos dos tiempos, y además interpretando la forma del registro en que las ondas van y vienen, es decir el registro de donde “salen” en el impacto y a donde “llegan” en el reflejo, se puede establecer el tipo de malformaciones en el pilote. Esto lo podemos ver en la siguiente figura:

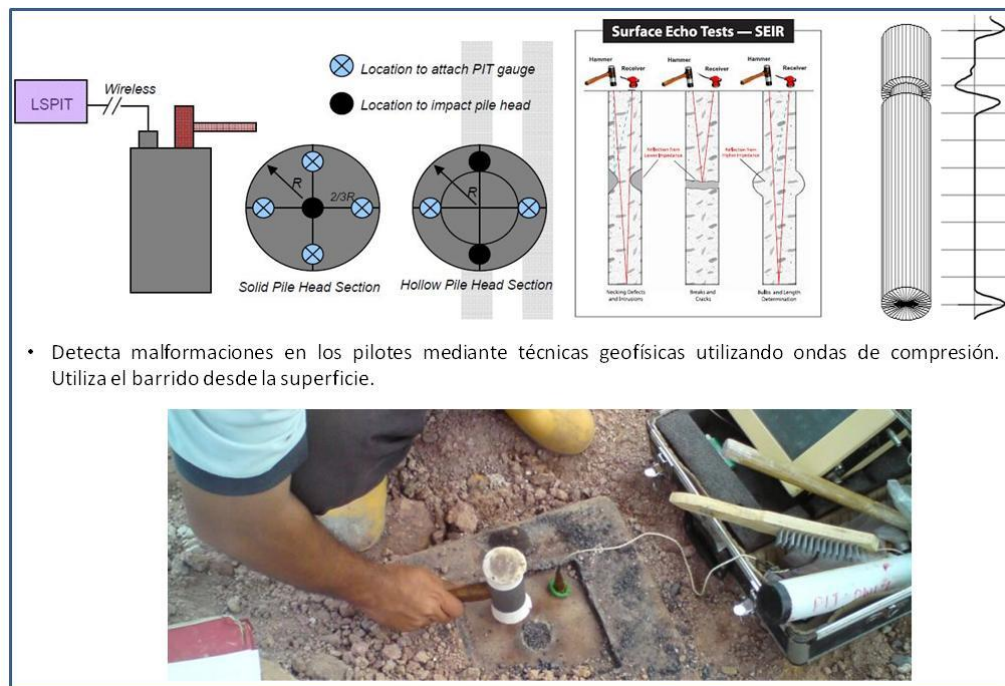


Figura 32. Prueba de muy baja energía para verificación de integridad estructural.

Fuente: Apuntes de Heriberto Echezuría, QA-QC para fundaciones profundas.

En la figura podemos ver cómo se pueden presentar las malformaciones (ensanchamientos, estrangulamientos, quiebres o discontinuidades) en la PIT mediante la reflexión anticipada de ondas, es decir antes de llegar al tiempo en que debería recorrer el pilote de forma teórica, la onda es reflejada. Además se puede ver la importancia de cubrir todo el perímetro del pilote con los golpes de baja energía para que no se escapen los derrumbes o estrangulamientos posibles que pueden existir.

Las malformaciones importantes en donde se debe tener cuidado son los estrangulamientos, espacios vacíos, cortes del pilote, oquedades, etc ya que estos afectan tanto la capacidad estructural del pilote como su capacidad geotécnica, no tanto así en las malformaciones por ensanchamiento en donde no se afecta ninguno de estos aspectos sino el consumo de concreto, cosa no tan grave.

En general según los argumentos propuestos por Echezuría, H se puede afirmar que esta prueba es bastante efectiva en la mayoría de los casos que se interpretan directamente de las ondas, y predicen acertadamente las malformaciones presentes, es decir la probabilidad de incurrir en errores tipo “ α ” y “ β ” es muy baja debido a su efectividad. Predicen cuando el pilote esta malo cuando en realidad esta malo y predicen que está bueno cuando en realidad está bueno.

Ello no quiere decir que no se pueden cometer errores utilizando esta prueba, rechazando pilotes que aplicando la misma arrojan pilotes que presentan malformaciones, pero que realmente están bien estructuralmente y no presentan estas supuestas malformaciones. Estos casos críticos en los que puede suceder este inconveniente se deben a que las ondas de compresión utilizan el modulo del suelo en estado confinado “M” en su definición y no el modulo elástico o módulo de Young “E”.

Este fenómeno ocasiona que en cualquier cambio brusco del grado de confinamiento en la dirección perpendicular al viaje de la onda se produzca un reflejo inmediatamente hacia el tope del pilote, cambiando así la forma del registro cuando en realidad dicho pilote está en buen estado. Por esto debe siempre llevarse junto con la prueba PIT, un control detallado del consumo de concreto metro por metro de pilote y debe tenerse el estudio de suelos o ensayo SPT para poder determinar si la interpretación de la prueba PIT es correcta o no.

Para analizar estos casos en mayor detalle se presentan a continuación resultados de pruebas PIT que interpretan en un caso un ensanchamiento y en el otro un estrangulamiento:

En ambos casos junto con el resultado de la prueba PIT se presenta la geometría esperada del pilote sin malformaciones (líneas rojas) y el ensayo SPT correspondiente al suelo de fundación.

- Ensanchamiento

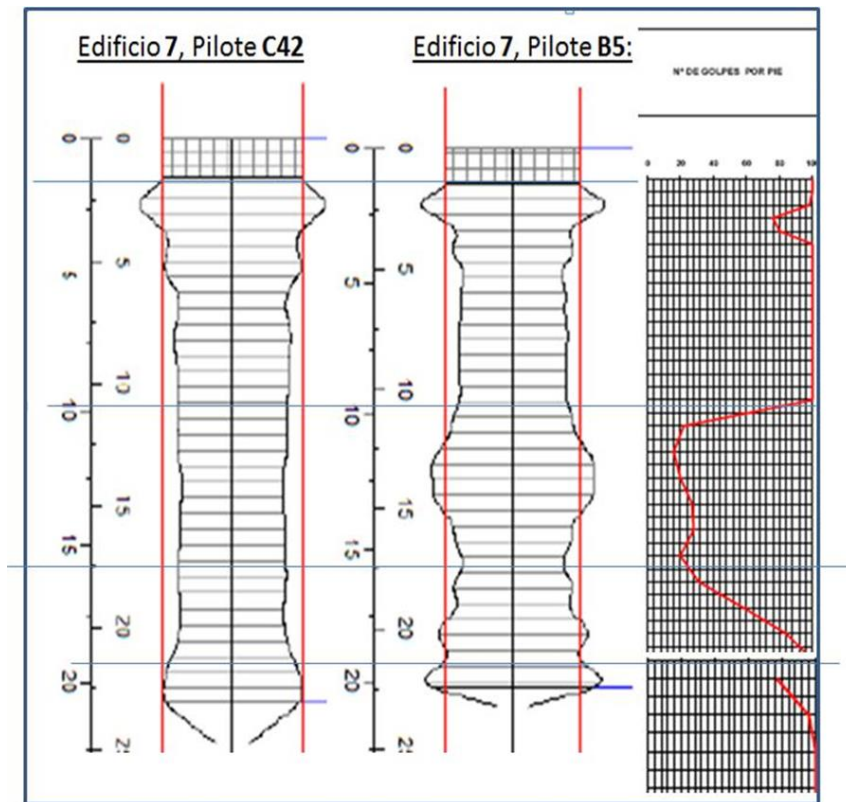


Figura 33. Resultado de prueba PIT con golpe desde la parte superior del pilote que predice ensanchamiento en el punto de cambio de confinamiento del elemento.

Fuente: Apuntes de Heriberto Echezuría, QA-QC para fundaciones profundas.

En este caso podemos ver como la prueba PIT arroja un ensanchamiento en ambos pilotes C42 Y B5, esto debido a la drástica disminución del grado de confinamiento en el suelo de 100 a 30 golpes que como se explicó ocasiona un reflejo de la onda.

En estos casos se debe de verificar si realmente existe esta anomalía ya que como se explico es normal que la prueba arroje este resultado por el cambio brusco de confinamiento. Esto debe hacerse verificando el consumo de concreto metro a metro.

En ambos pilotes se tenía estipulado un volumen de concreto teórico de 15 m^3 , pero se vaciaron 21 m^3 de concreto en la realidad y la variación del consumo metro a metro no es sustancial (prácticamente uniforme), cosa que en caso de existir un ensanchamiento no debería ocurrir. Por tanto la conclusión final al problema es que existe un diámetro prácticamente uniforme pero mayor al esperado por una sobre excavación que pudo haber sido por problemas de vibración de la máquina perforadora y también de inestabilidad del suelo arenoso del perfil.

En todo caso, el pilote no tiene estrangulamientos ni oquedades que son los detalles realmente no deseados.

- Estrangulamiento

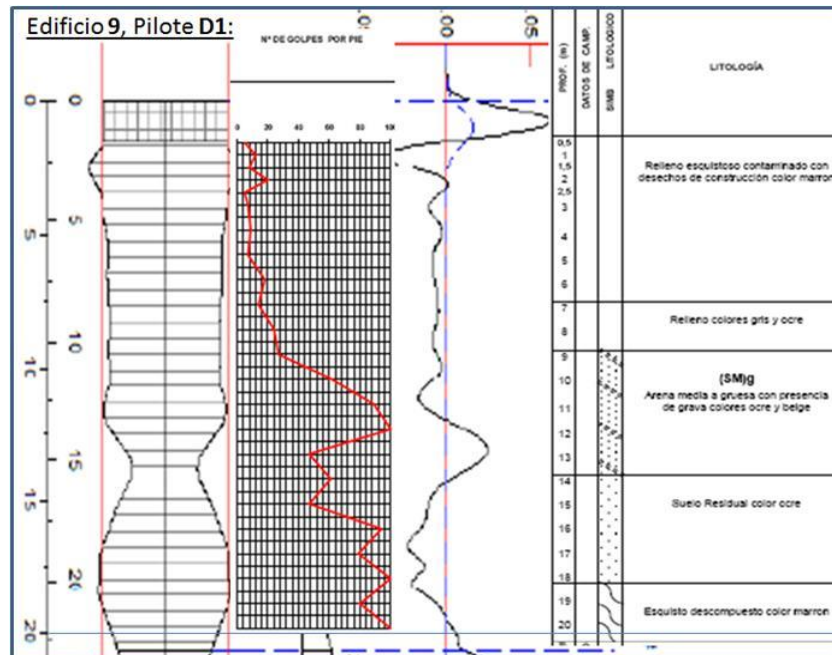


Figura 34. Resultado de prueba PIT con golpe desde la parte superior del pilote que predice estrangulamiento en el punto de cambio de confinamiento del elemento.

Fuente: Apuntes de Heriberto Echezuría, QA-QC para fundaciones profundas.

En este caso la prueba PIT detecta dos posibles estrangulamientos en el pilote, los cuales están justo en los lugares en donde existen cambios en el grado de confinamiento de bajo a alto y luego de alto a bajo por lo que hay que analizar el consumo de concreto nuevamente para poder concluir el asunto de la interpretación de la prueba.

Para este pilote nuevamente el total de concreto vaciado en sitio es mayor que el esperado teóricamente, y su tasa de variación metro a metro es constante, cosa que en caso de existir un estrangulamiento no debería ocurrir ya que el consumo debería haber disminuido en ese punto.

Al igual que en el caso anterior hubo una sobre excavación que ocasiono el aumento del consumo de concreto respecto al teórico y fue descartado el estrangulamiento detectado por la prueba PIT

Es importante destacar entonces que debido a que la prueba no es capaz de discernir solo con la forma de la onda reflejada los cambios en el grado de confinamiento del suelo, se debe contar con un especialista que pueda combinar todos los elementos ocurridos durante el vaciado y no solamente la descripción de los aspectos geofísicos.

En los demás casos en donde no se tenga cambios bruscos en el grado de confinamiento del suelo y la PIT detecte un problema este generalmente es acertado, pero de todas formas debe chequearse.

2.3.11 Prueba de baja energía para estimar la capacidad portante

En una prueba dinámica de baja energía es necesario, igual que con la prueba del PIT, se debe contar con geófonos, deformímetros y acelerómetros para lograr registrar con éxito el comportamiento en todo momento del pilote.

Para lograr estimar la fuerza de fricción a lo largo del pilote y la carga de punta; es necesario desplazar el pilote para que estas fuerzas comiencen a aparecer, se basa entonces en las mismas premisas del PIT, utilizando el tiempo de viaje de la onda. Pero en este caso es necesario utilizar una masa de mayor peso usualmente ronda entre (500 -2000) Kg y se libera en caída libre, a una altura determinada, logrando así un desplazamiento.

Para mayor detalle sobre cómo obtener estas energías de impacto que ha de dar el martillo, y tomando en cuenta que existen perdidas tanto en el sistema del martillo en si, como en el suelo por el efecto del amortiguamiento o la impedancia, debe referirse a Álvarez, A y Alfonzo, F, “Estimación de las capacidades de fuste y punta en pilotes mediante ensayos dinámicos de baja energía”, (2018).

Es importante señalar el comentario expuesto por el Ing. Echezuría, Heriberto en su artículo: Pruebas Estáticas y Dinámicas para Pilotes, (2017), pagina 18, “se han comparado ensayos estáticos con resultados de pruebas dinámicas, tal como se muestra en la Fig. 35, realizadas a la profundidad de rechazo del pilote. Adicionalmente, el autor ha aplicado esta metodología para evaluar la capacidad de pilotes estudiados con la prueba dinámica, y la ha comparado con la obtenida de las curvas normalizadas provenientes de pruebas estáticas, encontrando un muy buen ajuste entre ambas.”

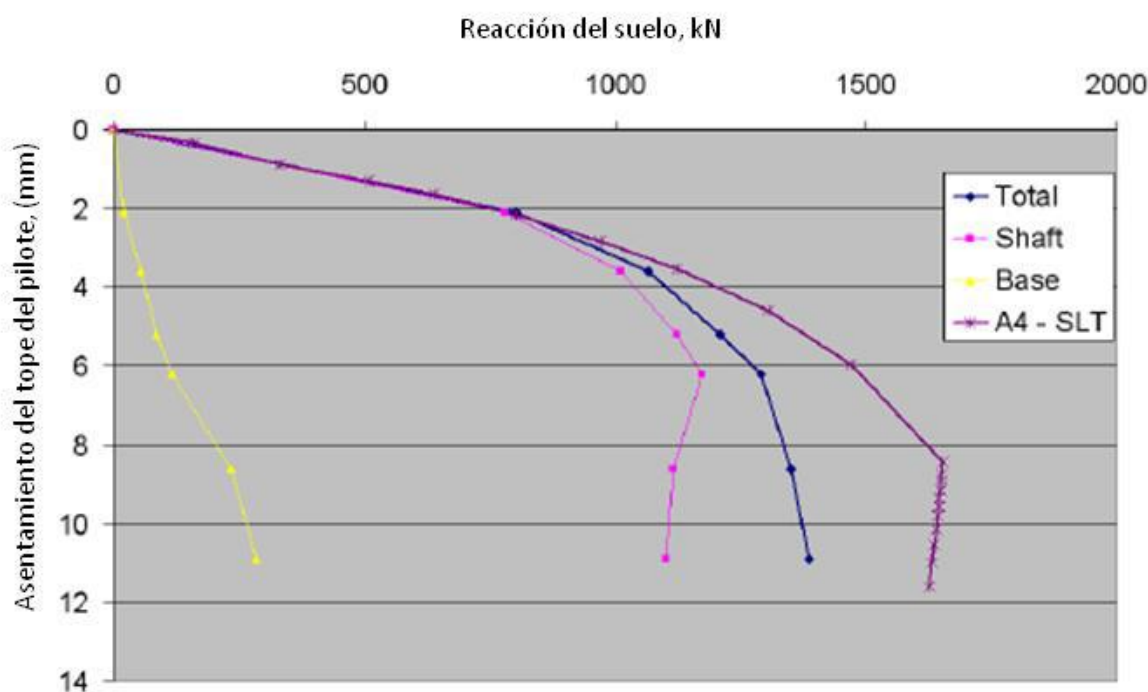


Figura 35. Comparación de capacidades medidas en pilotes idénticos ensayados con cargas estáticas y con pruebas dinámicas.

Fuente. Apuntes de Heriberto Echezuría, Pruebas estáticas y dinámica en pilotes.

En la figura 35 se hace notar la perfecta coincidencia entre un ensayo dinámico y uno estático, hasta llegar a un asentamiento de 2mm, después de este asentamiento las curvas de los ensayos se comienzan a separar, en esta prueba tanto el ensayo dinámico y el estático se llevaron a la rotura, donde hay que recordar que el ensayo dinámico no busca ser un ensayo destructivo.

Queda así evidenciado en la figura 35, que a asentamientos pequeños el ensayo dinámico entra en el rango estático, haciendo posible comparar ambos ensayos. El asentamiento límite estático dependerá de varios factores del suelo y geometría del pilote.

El Ing. Echezuría, Heriberto demostró lo expuesto anteriormente a través de ensayos en campo (ver Fig. 36), primero estimo la carga portante del pilote mediante un ensayo dinámico utilizando el programa (CAPWAP) y obtuvo en el pilote A3 un valor de 490. A manera de comprobación estimo la capacidad de punta y fricción mediante las gráficas de Reese y O'Neill por estar en rango estático logrando obtener para fricción 380 kN y para la punta 110 kN, demostrando así que para asentamiento muy pequeño (menor a los 3 mm) es posible estimar las capacidades a través de las curvas de Reese y O'Neill.

Es de notar que para asentamientos muy pequeños la fricción es la primera en desarrollarse.

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

Figura 36. Comprobación de resultados obtenidos en campo mediante ensayos dinámico con las curvas estáticas de Reese y O'Neill

Fuente. Apuntes de Heriberto Echezuría, Pruebas estáticas y dinámica en pilotes.

2.3.12 Aseguramiento de calidad (QA) y Control de calidad (QC)

Según ISO 9000 define QA y QC como:

- Control de calidad (QC): Las técnicas y actividades operacionales que se utilizan para cumplir los requisitos de calidad
- Aseguramiento de calidad (QA): Todas las actividades planificadas y sistemáticas implementadas para brindar la confianza adecuada de que una entidad cumplirá con los requisitos de calidad.

Muchas de las empresas actualmente, se enfocan en todos los criterios del (QA) establecidos para pilotes en normativas como “AASHTO T-298 Sección 1807, ASCE - Standard guidelines for the design and installation of Pile Foundations, (FDOT) Florida departamento of trasportation – Sección 455, entre otras”, y asignan a un ingeniero inspector que viene del área de diseño para que verifique todos estos criterios. Estos mismos tienden a menoscabar los procesos constructivos (QC).

Muchos de los inspectores se rigen por el QA debido a la definición planteada por la ISO, donde sí se asegura la calidad, se logra cumplir de manera indirecta el QC.

En pilotes ambos conceptos son totalmente independientes debido a que, si bien un aseguramiento de calidad es importante, este no garantiza en campo el control de calidad, ya que en obra hay diversos factores que escapan fuera de su alcance. Los cuales no fueron tomados en cuenta durante el diseño, viéndose entonces afectado la integridad del pilote.

Durante el diseño se plantea un pilote “perfecto” donde este desarrolla por ejemplo la fuerza de fricción por el contacto del suelo en toda la periferia del mismo, pero si al momento de vaciar no se siguen las recomendaciones de diversos autores como “Mullins y Ashmawy, “Factors affecting anomaly formation in drilled shafts”, Marzo 2005.”, se formarían oquedades o cavernas que afecten la integridad estructural. Por lo cual el cálculo previo se verá afectado.

Es por eso que, para muchos inspectores, si los pilotes cumplen todas las consideraciones del QA, aceptan que están completamente íntegros, lo cual es falso, demostrado en este TEG que, cuando se vacía sin seguir las recomendaciones, es por esto que es necesario utilizar ensayos como el PIT para verificar la integridad estructural del pilote, obteniendo así un cumplimiento del control de calidad.

Debido a la falta de alguna norma del control de calidad, no se tiene la certeza de a qué cantidad de pilotes hay que hacerle un ensayo PIT para verificar la integridad estructural, algunos autores expresan el 1% del lote, por lo que los inspectores nunca están conformes con el número de ensayos, paralizando la obra y ocasionando pérdidas económicas. Debido a esto en esta TEG se plantea un plan de inspección de pilotes en donde ambas partes estén protegidas contra cualquier suceso.

2.3.13 Plan de inspección

Un plan de inspección es un esquema basado en reglas estadísticas que permite de forma práctica el establecimiento de criterios de aceptación y rechazo que sean favorables por mutuo acuerdo entre las partes involucradas.

Estos planes de inspección deben ser como se menciona acordados entre ambas partes, comprador y vendedor siempre tomando en cuenta además de los criterios matemáticos y estadísticos, los criterios ingenieriles que permitan con un sentido práctico el correcto desempeño del plan de inspección.

En cualquier plan de inspección por muy estrictos que sean los criterios de aceptación y rechazo de un lote, no se puede escapar del riesgo que existe de cometer errores asociados a esto conocidos como:

- Error tipo I, también llamado α o riesgo del vendedor.

Supone el riesgo de que al poner en marcha un plan de inspección para un determinado lote se rechace un lote que cumple perfectamente con las características adecuadas (no defectuoso).

- Error tipo II, también llamado β o riesgo del comprador.

Supone el riesgo de que al poner en marcha un plan de inspección para un determinado lote se acepte un lote defectuoso que no cumple con las características adecuadas.

Existen dos tipos de planes de inspección, aquellos que se basan en atributos y los llamados planes por variables. El establecimiento del plan de inspección a ser utilizado depende fundamentalmente de esto, ya que según el tipo de producto se puede analizar si el mismo puede ser estudiado por características especiales y particulares visibles en elementos de una muestra (atributos), o si se tiene que debe ser por medida física de una propiedad de los elementos en una muestra (variable).

Según Ing, Centeno, Roberto en “Inspección y Control de obras civiles”, un atributo es una característica, la cual por su presencia o ausencia clasifica a una unidad o segmento de un lote como aceptable o rechazable, mientras que una variable es una medida que puede tener una serie de valores diferentes.

Los planes de inspección se fundamentan en la toma de muestras de forma aleatoria dependiendo del tamaño del lote, y en conjunto con el nivel aceptable de calidad (AQL), el riesgo del consumidor y riesgo de comprador, fijar las decisiones respectivas o criterios de cuantas muestras pueden ser defectuosas como máximo para aceptar el lote.

Los planes de inspección pueden ser:

- Simples: Consiste en la toma de una sola muestra y con los resultados obtenidos se debe tomar la decisión de aceptar o rechazar el lote con base en los criterios fijados.
- Dobles: Consiste en tomar una primera muestra y en base al resultado obtenido si cumple con los criterios de aceptación y rechazo, se acepta el lote, sino cumple, se rechaza, y si se está en un intermedio se toma una segunda muestra y con ella se adjudica la decisión final.
- Múltiples: El principio es exactamente igual al del muestreo doble, pero en este caso se puede llegar a tomar hasta cinco muestras para dar el veredicto final.

Existen en los planes de inspección 3 niveles de inspección dependiendo del grado de muestreo que se puede tomar:

- Nivel I: Se utiliza cuando el tamaño de muestra que se puede tomar es pequeño por cualquier motivo.
- Nivel II: Se utiliza cuando el tamaño de muestra que se puede tomar es intermedio, generalmente es el más utilizado.
- Nivel III: Se utiliza cuando el tamaño de muestra que se puede tomar es grande.

Existen además 3 tipos de inspección dependiendo de cuan estricto ha de ser el plan en cuanto a los criterios de aceptación:

- Inspección normal: Se usa cuando la calidad del proceso es superior al AQL y no se sospecha que el mismo no tiene una calidad aceptable, para asegurar una buena probabilidad de aceptación.
- Inspección estricta: Se usa cuando existe evidencia de que la calidad del proceso es inferior al AQL para componer criterios de aceptación más estrictos que en la inspección normal.
- Inspección reducida: Se usa cuando en una cierta cantidad de lotes existe evidencia de que el proceso tiene una calidad mejor que el AQL, asegura altísimas probabilidades de aceptación ya que compone criterios de aceptación más blandos.

Un plan de inspección se construye con una curva estadística llamada curva característica de operación basada en el establecimiento de un nivel AQL y un riesgo de consumidor y productor fijados.

2.3.14 Nivel aceptable de calidad (AQL)

Según R. Centeno en “Inspección y Control de obras civiles”, el “Acceptable Quality Level” se refiere al máximo percentil promedio defectuoso en el lote que puede ser considerado como aceptable sin que el producto resultante muestre un comportamiento riesgoso para la estructura.

Un percentil promedio es aquel que toma en cuenta los defectos que se encuentran repartidos en todo el lote, es decir, el AQL se basa en que existan defectos repartidos y no solamente en un determinado sector del lote, en cuyo caso esto se debería a un fallo en el sistema constructivo empleado.

En caso de que esto suceda el lote debe considerarse como defectuoso inmediatamente. Se puede apreciar con más detalle en la figura 37 a continuación:

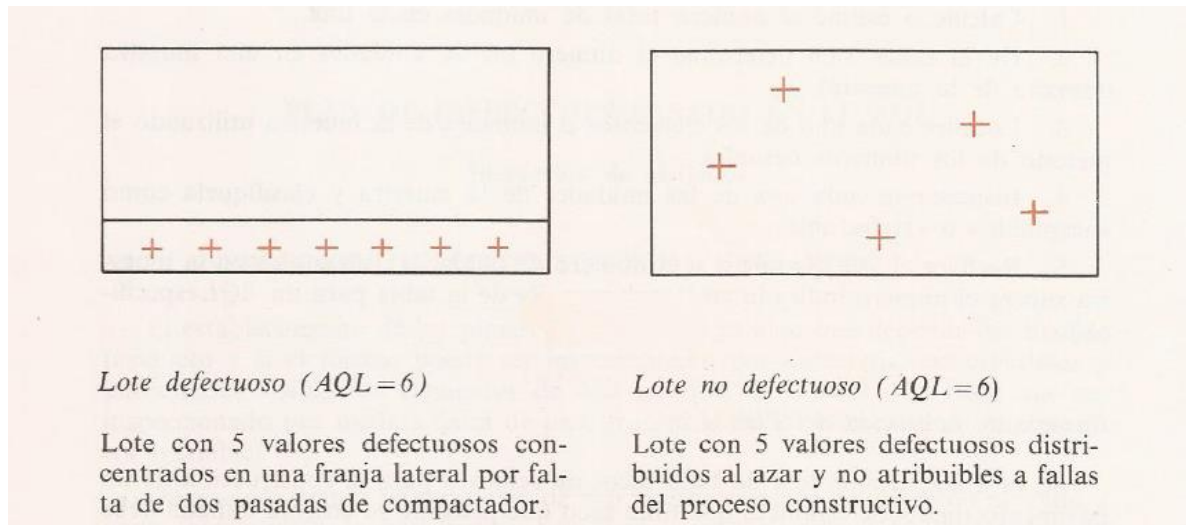


Figura 37. Comparación de defectos, repartidos en todo el lote vs en un solo sector.

Fuente: Inspección y Control de obras civiles, Cap. 6 R. Centeno.

Un AQL menor o igual que diez (10) significa que este viene expresado en términos de porcentaje de elementos defectuosos admisibles respecto al lote total, mientras que si es mayor que diez este indica el número de defectos admisibles por cada 100 unidades del elemento en estudio inspeccionado.

El AQL tiene estrecha relación con el “Porcentaje Defectuoso Admisible en la Muestra” (PDAM), el cual según Centeno. R depende del tamaño de muestra, es decir, para un mismo valor de AQL, el PDAM será mayor a medida que el tamaño de muestra sea menor, lo cual tiene su fundamento lógico basado en que la probabilidad de obtener parámetros de la población crece a medida que el tamaño de la muestra crece.

2.3.15 Curva característica de operación

La curva característica de operación es un gráfico en donde se muestra la probabilidad de aceptación vs el porcentaje de elementos defectuosos en la muestra. La misma es construida fijando un tamaño de muestra, riesgo de comprador, riesgo de vendedor, AQL, y CL o PDAM (rango máximo de calidad aceptable), por lo que es la base elemental de un plan de inspección.

Con ella es que se puede estudiar la efectividad del plan de muestreo, es decir si la curva cumple con las características necesarias el plan es bueno y de lo contrario deben modificarse alguno de los valores para poder establecer un mejor plan. Es decir, la curva proporciona el potencial desempeño del plan de inspección ya que se puede estimar la probabilidad de aceptar o rechazar lotes de determinada calidad en específico.

A continuación, se muestra una curva de operación típica:

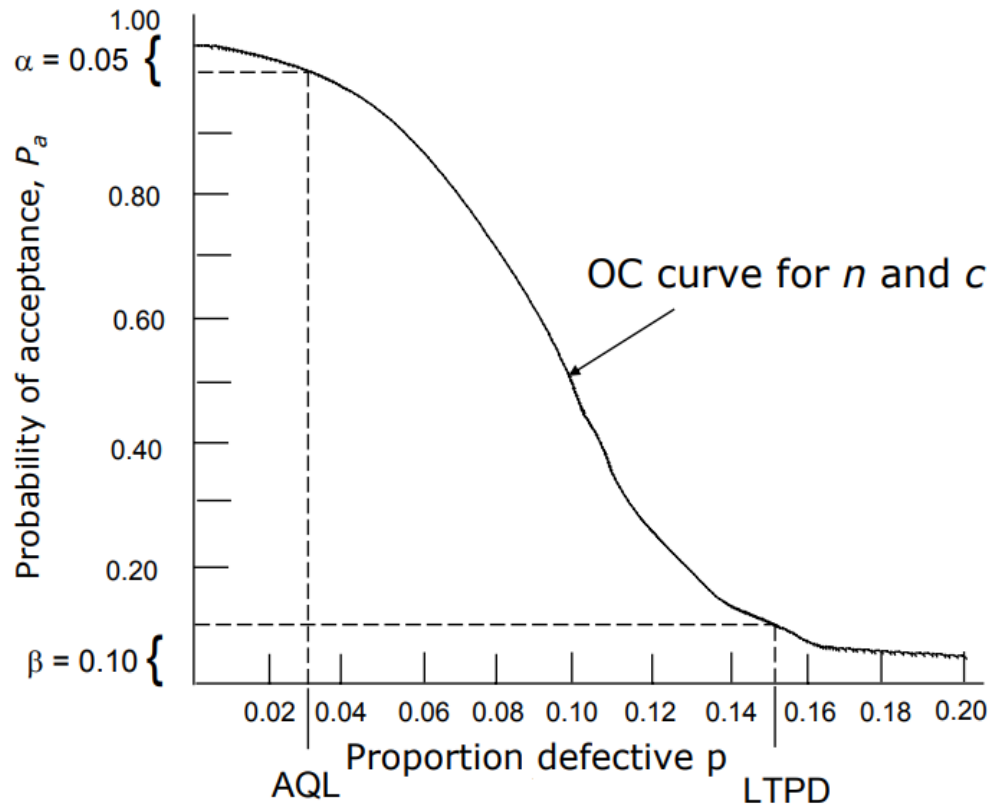


Figura 38. Falla por falta de vibrado en el concreto.

Fuente. "Acceptance Sampling", OPRE 6364, (2007).

Recuperado de:

http://web.tecnico.ulisboa.pt/mcasquilho/acad/cq/qfund/Q_AS_UTexD.pdf

Un plan de inspección ideal sería el que posea una curva característica de operación en forma de rectángulo con base desde 0 a AQL, es decir un plan en donde se rechace cualquier lote que no posea una calidad AQL y se acepten todos los lotes de calidad AQL o mejor, pero esto es imposible en la realidad.

En el caso de muestreo por atributos es un tanto complicado lograr una curva de operación que cumpla con un AQL y un PDAM dado, debido a que tanto el tamaño de muestra como el número de aceptación deben ser números enteros. Cuando se refiere a LTPD como en el grafico presentado, este es exactamente igual que el PDAM ya presentado.

Las curvas características de operación se construyen con diferentes funciones estadísticas, dependiendo del tamaño de muestra y del AQL, tal como se describe a continuación:

1. Curvas de operación para índices de AQL mayores que 10

Estas curvas siguen o están fundamentadas en una distribución de Poisson y son aplicables para defectos por cada 100 unidades de muestreo o inspección.

2. Curvas de operación para índices de AQL menores o iguales que 10 y tamaño de muestra menor o igual que 80 unidades:

Estas curvas de operación siguen perfectamente una distribución binomial clásica y solo son aplicables para porcentajes defectuosos de unidades inspeccionadas en la muestra.

3. Curvas de operación para índices de AQL menores o iguales que 10 y tamaño de muestra mayor que 80 unidades:

Estas curvas al igual que las del punto número uno, siguen o están fundamentadas en una distribución de Poisson y son aplicables tanto para defectos por cada 100 unidades de muestreo o inspección, como para porcentajes defectuosos de unidades inspeccionadas en la muestra.

CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación

Este trabajo especial de grado puede ser catalogado según lo establecido por el Ing. Pedro José Salinas en su artículo “Metodología de la investigación científica” como una investigación aplicada, debido a que la misma se basa en descubrimientos y hallazgos de investigaciones pasadas y de campo para lograr establecer la solución a problemas e inconvenientes específicos.

3.2 Diseño de la investigación

La investigación es de carácter no experimental, apoyada sobre fuentes documentales, investigaciones y experiencia en campo. La misma está basada para su desarrollo en: data existente en la bibliografía, experiencia de ocurrencias en el tiempo por parte de profesionales respectivos del área competente, y por investigación bibliográfica a través de la consulta de libros y material bibliográfico como publicaciones, expedientes, normas, entre otros.

3.3 Delineación de la investigación

A continuación, se procederá a describir de forma ordenada en consecuencia con el orden de la investigación los puntos tratados para lograr los objetivos planteados:

1. Búsqueda y recolección de datos

Se procedió a la búsqueda de data estadística y experimental de buen fundamento necesaria para el entendimiento de las variables que traen problemas estructurales a los pilotes afectando su integridad, y aquellas que traen como consecuencia la afectación de la capacidad portante de los mismos. Así como también para el establecimiento de un de inspección de pilotes que se adaptase a lo requerido.

2. Estudios estadísticos

Mediante el uso de la data recolectada se adaptó un árbol de decisión basado en procesos de Bernoulli que tomara en consideración todas las variables asociadas a la afectación de la integridad estructural y de la capacidad portante de un pilote.

Se construyó un árbol de decisión que permita estimar el posible desarrollo de la capacidad portante de un pilote en asentamientos normales mediante la utilización de ensayos dinámicos de baja energía, asentamiento que permitan la equiparación de los ensayos estáticos como los realizados por los investigadores Reese y O'Neill.

Se procedió a elaborar un plan de inspección por atributos para la aceptación y rechazo de lotes de pilotes basado en curvas de operación, con la ayuda de lo propuesto en “inspección y control de obras civiles” por el Ing. Roberto Centeno.

3. Análisis sensibilidad

Utilizando los arboles planteados, y tomando en consideración la data buscada tanto por: a) medios bibliográficos; b) referencias basadas en la experiencia de profesionales en el campo de estudio, y además las variables asociadas a problemas de integridad y capacidad portante, se procedió a realizar un análisis de sensibilidad que mostrase las probabilidades de falla asociadas a las diferentes variables.

Con las probabilidades de falla de cada variable y los diferentes tamaños de muestra establecidos en el plan de inspección se procedió a hallar la probabilidad de hallar pilotes dañados estructuralmente en la muestra mediante una distribución estadística binomial.

4. Revisión de normativas existentes

Se recolecto la información contenida en normativas tanto internacionales como nacionales sobre la inspección por atributos, y con ello se realizó una discriminación de la información para ser aplicada junto con lo obtenido en este documento para la elaboración de la propuesta de normativa.

5. Elaboración de la propuesta de normativa

Como fase final se compilo toda la información necesaria para la elaboración del documento para su posterior redacción.

CAPÍTULO 4: DESARROLLO Y RESULTADOS

En este capítulo se presentará con más detalle el desarrollo aplicado para la obtención de los resultados necesarios para la elaboración de la propuesta de normativa de aceptación y rechazo de pilotes.

4.1 Identificación de las variables que afectan la integridad estructural de un pilote

Las selección de variables que afectan a la integridad estructural de un pilote aquí mostradas provienen tanto de la experiencia profesional de nuestro tutor como de otros ingenieros, y además de la investigación realizada por Mullins, Gray and Ashmawy, Alaa k “Factors affecting anomaly formation in drilled shafts”, University of south Florida, (2005).

Los factores más importantes que afectan la integridad estructural de un pilote excavado son:

1. Tipo de vaciado

En este caso se presentan los dos tipos de vaciado que se utilizan en obra: a) Desde el tope sin tremie y b) Con bomba y utilizando tremie

El método de vaciado correcto es utilizando bomba y tremie, debido a que se evita la disgregación, desprendimiento de paredes, y golpes abruptos dentro del hoyo no favoreciendo la mezcla del concreto y afectando la integridad estructural del pilote.

2. Tamaño máximo del agregado vs separación del acero

Al ser el agregado utilizado en la mezcla más grande que el espaciamiento entre la cajuela de acero, el concreto no logra introducirse correctamente a través del refuerzo, y por ende se generan espacios vacíos o cavernas que afectan a la integridad del pilote.

3. Asentamiento

Al no cumplirse el asentamiento requerido por el concreto para el vaciado de un pilote se generan problemas por la dificultad que implica el llenado de los espacios vacíos y penetración a través de la cajuela de refuerzo. Esta condición hace que sea más complicado el paso del concreto a través del acero, mas no lo impide como lo hace el punto anterior.

Cabe destacar que este problema puede ser aplacado en cierta forma con un vibrado ejecutado adecuadamente que logre llenar todos los espacios vacíos en el pilote.

4. Verticalidad del acero

Esta condición hace que al introducir la cajuela de refuerzo estructural, el mismo choque contra las paredes produciendo una especie de esfuerzo cortante y con ello favoreciendo a la formación de cavernas y derrumbes.

Es importante destacar que el viento es un factor que afecta a esta variable, es un evento fortuito que no podemos controlar pero se debe tomar en cuenta.

5. Verticalidad del hoyo

Esta variable juega un papel que no es tan relevante desde el punto de vista estructural sino que induce esfuerzos por la naturaleza propia del agujero no recto que no estaban contemplados en el diseño del pilote y puede ocasionar que se supere su capacidad admisible.

Ahora bien es importante que el agujero quede totalmente a plomo ya que de no ser así, a la hora de introducir el acero se generaran problemas de choque en toda la longitud del pilote que a su vez favorecen la formación de cavernas y derrumbes.

6. Lavado del pozo

El lavado del pozo cuando la perforación se realiza con lodos bentoníticos es muy importante ya que durante la perforación el lodo se contamina de material haciéndose más denso. Al este ser más denso puede presentarse la condición de que en el momento del vaciado el concreto no logre desplazar al lodo y este se quede atrapado en la mezcla, produciéndose así burbujas que se asemejan a una caverna y afectan a la integridad estructural del pilote.

7. Aseguramiento de calidad (QA)

Se incluyó esta variable debido a que se busca demostrar que la misma no afecta en realidad a la integridad estructural de un pilote, sino que más bien son los aspectos constructivos los que realmente importan.

Para mayor descripción de cada una de estas variables, referirse al capítulo 2, apartado 2.3.6 del presente documento.

4.2 Selección de data histórica para aplicación de modelo estadístico

Para poder asignar valores bien referenciados que relacionaran las variables presentadas con sus respectivas probabilidades de obtener pilotes íntegros y no íntegros, se buscó una data histórica que funcionara como sustento.

Dicha data fue ubicada en el trabajo de los alemanes Klingmuller, Oswald and Kirsch, Fabian, “A quality and safety issue for cast in place piles with low strain integrity testing in Germany”, (1998). Este trabajo se encuentra en los antecedentes ubicados en el capítulo 2, apartado 2.1.

En este trabajo dichos investigadores recopilaron la información de ensayos de ensayos de muy baja energía realizados durante 25 años a pilotes que fueron construidos siguiendo un buen nivel de ejecución en obra, de esta data se estableció que existe una

probabilidad de obtener pilotes defectuosos desde el punto de vista de integridad estructural de 0,0033.

4.3 Elaboración de árbol de decisión para estimación de probabilidad de daño estructural

Para la estimación de la probabilidad de daño estructural se construyó un árbol de decisión basado en procesos de Bernoulli en donde solo existe la posibilidad de éxito y fracaso. En el árbol se colocaron todas las variables que intervienen en la integridad estructural de un pilote, presentadas anteriormente.

Debido a la falta de conocimiento de la probabilidad de obtener un pilote bueno o malo cuando el nivel de ejecución es excelente, es decir cuando ninguna variable falla, se calibró el árbol utilizando la data prestada por los investigadores alemanes, ya que es un valor muy robusto y confiable por su trayectoria durante tantos años de investigación. Es decir la probabilidad de obtener un pilote malo por integridad estructural debe ser siempre 0.0033 al final del árbol.

Ahora bien, es oportuno destacar que ninguno de los aspectos presentados en las referencias consultadas sobre QA, (AASHTO T-298 Sección 1807, ASCE - Standard guidelines for the design and installation of Pile Foundations, (FDOT) Florida departamento of transportation – Sección 455) coinciden con las variables que afectan a la integridad estructural de un pilote de acuerdo con la literatura consultada en la sección 4.1 de este TEG. Recuérdese que dicha bibliografía está enfocada fundamentalmente en los factores que afectan la integridad de los pilotes durante la construcción. Las variables citadas en los QA consultados parecen estar más relacionadas con el desarrollo de la capacidad del pilote una vez construido, en lugar de garantizar su integridad durante la construcción.

En consecuencia, y a falta de mayor información, se ha tomado un valor arranque para efectos de calibración del árbol de probabilidad de obtener un pilote íntegro del 60% y no íntegro del 40% para QA (a esto le llamaremos nivel de QA intermedio), ya que este trata de asegurar la calidad del pilote más no parece afectar directamente en la integridad estructural del mismo. No obstante como parte de la investigación, una vez calibrado el árbol de decisión se evaluara la influencia que tiene el QA en la calidad de los pilotes construidos.

Cabe destacar que esto no quiere decir que el cumplimiento de los aspectos indicados en las diferentes normativas de QA no es importante, ya que los mismos llevan una carga de experiencia de profesionales que se han dedicado a estudiar estos parámetros y siempre deben tratar de cumplirse. Sin embargo, a la hora de construir un pilote, existen muchos factores en obra como ya se mencionó, que hacen que un pilote quede mal, y estos no están todos controlados por las variables encontradas dentro de los QA consultados. Por lo que, al final de cuentas, no necesariamente el incumplimiento del procedimiento

establecido en QA, implica que la integridad de un pilote quede afectada durante la construcción.

Una vez aclarado todos estos aspectos mencionados, se procederá a explicar cómo se calibró el árbol de decisión siempre teniendo en cuenta que el valor de referencia es el prestado por los investigadores alemanes.

El árbol se ajustó con base en las siguientes premisas:

1. Seleccionando las probabilidades de obtener un pilote íntegro y no íntegro para cada variable incluida en el árbol con un buen nivel de ejecución constructiva
2. Agrupando las rutas del árbol que conducen hacia un pilote íntegro y un pilote no íntegro, tomando en cuenta todas las variables asociadas del proceso.

El objetivo de la calibración es ajustar las probabilidades de cada pregunta del árbol hasta obtener la probabilidad de un pilote no íntegro igual a la utilizada como referencia de los alemanes Klingmuller, Oswald and Kirsch, Fabian, “A quality and safety issue for cast in place piles with low strain integrity testing in Germany”, (1998). Las probabilidades correspondientes a cada una de las ramas del árbol se encuentran en la Tabla 1. Es oportuno destacar que esas probabilidades fueron ajustadas todas considerando que si se ejecutan adecuadamente en campo, se obtiene por las secuencias seleccionadas para agrupar la mala calidad del pilote o falta de integridad la probabilidad tomada de la literatura de los alemanes. Esto se incluye en el Anexo 1.

Tabla 1. Probabilidades de obtener un pilote íntegro/no íntegro para la integridad ya ajustadas.

PROBABILIDAD DE PILOTE BUENO CON VACIADO DESDE FONDO	0.997
PROBABILIDAD DE PILOTE BUENO CON VACIADO DESDE TOPE	0.003
PROBABILIDAD DE PILOTE BUENO CUMPLIENDO QA	0.6
PROBABILIDAD DE PILOTE BUENO NO CUMPLIENDO QA	0.4
PROBABILIDAD DE PILOTE BUENO SI SE CUMPLE ESPACIAMIENTO MINIMO DE ACERO RESPECTO AL TAMAÑO MAXIMO DEL AGREGADO	0.997
PROBABILIDAD DE PILOTE BUENO SI NO SE CUMPLE ESPACIAMIENTO MINIMO DE ACERO RESPECTO AL TAMAÑO MAXIMO DEL AGREGADO	0.003
PROBABILIDAD PILOTE BUENO CON HOYO VERTICAL	0.997
PROBABILIDAD PILOTE BUENO CON HOYO NO VERTICAL	0.003
PROBABILIDAD PILOTE BUENO CON POZO BIEN LAVADO	0.997
PROBABILIDAD PILOTE BUENO CON POZO MAL LAVADO	0.003
PROBABILIDAD DE PILOTE BUENO CHEQUEANDO LA VERTICALIDAD DEL ACERO (Viento influye)	0.997
PROBABILIDAD DE PILOTE BUENO NO CHEQUEANDO LA VERTICALIDAD DEL ACERO (Viento influye)	0.003
PROBABILIDAD DE PILOTE BUENO CHEQUEANDO EL ASENTAMIENTO DEL CONCRETO (Vibrado influye)	0.997
PROBABILIDAD DE PILOTE BUENO NO CHEQUEANDO EL ASENTAMIENTO DEL CONCRETO (Vibrado influye)	0.003

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Resultados de aplicación del árbol de decisión para cada ruta.

Hay 7 preguntas, podemos dividir el escenario considerado:			
Caso	Estado del pilote	#Preg malas	Probabilidad
0 malas	- Pilote perfecto	1	0.589280677
1 mala	- Pilote excelente (defectos imperceptibles)	7	0.403492754
2 malas	- Pilote aceptable (defectos menores)	21	0.007172678
3 malas	- Pilote malo (defectos visibles)	35	5.3676E-05
4 malas	- Pilote muy malo (bastantes defectos visibles)	35	2.14786E-07
5 malas	- Pilote extremadamente malo (defectos graves)	21	4.83961E-10
6 malas	- Pilote catastrófico (defectos graves abundantes)	7	5.81888E-13
7 malas	- Pilote inaceptable (inaceptable)	1	2.916E-16
Son 128 estados posibles			1.0000000

Fuente: Elaboración propia.

Luego de aplicar el árbol de decisión y agrupar las rutas que conducen hacia un pilote íntegro o no, se nota que corresponden con el valor presentado por los alemanes, por lo que se considera bien calibrado. En la Tabla 3 a continuación se aprecia lo comentado:

Tabla 3. Probabilidad de un pilote íntegro/no íntegro para el árbol de decisión.

PROB PILOTE NO INTEGRO ALEMANIA	0.003333
PROB PILOTE NO INTEGRO ESTE ARBOL	0.00364
PROB PILOTE INTEGRO ESTE ARBOL	0.99636

Fuente: Elaboración propia.

A este pilote construido cumpliendo con todas las variables y con un nivel intermedio de aseguramiento de calidad lo llamaremos “pilote perfecto”.

4.4 Evaluación de la influencia de las variables QA encontradas en la integridad de los pilotes

Para evaluar la influencia del QA en la afectación de la integridad estructural de un pilote, se procedió a aplicar el árbol de decisión en dos casos diferentes al de pilote perfecto. Dichos casos son: a) asignando a QA un valor equivalente a la falla, es decir si no se cumple nada de lo estipulado en las normas para QA la probabilidad de obtener un pilote no íntegro sería 99% y la probabilidad de que quedara íntegro sería de 1%, y b) Cumpliendo QA a cabalidad, con probabilidad de pilote íntegro de 99% y no íntegro 1%.

Las demás variables del árbol se mantuvieron iguales al caso de la calibración del árbol, es decir 99.7% íntegro y 0.003% no íntegro. A continuación se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 4:

Tabla 4. Probabilidad de pilote íntegro/no íntegro para falla y cumplimiento de QA.

NIVEL DE EJECUCIÓN	PROB PILOTE INTEGRO	PROB PILOTE NO INTEGRO
EXCELENTE NIVEL DE EJECUCIÓN PRESTANDO CUIDADO AL QA (99% íntegro, 1% no íntegro)	0.9998	0.0002
EXCELENTE NIVEL DE EJECUCIÓN SIN PRESTARLE MAYOR CUIDADO AL QA (60% íntegro, 40% no íntegro)	0.9964	0.0036
EXCELENTE NIVEL DE EJECUCIÓN SIN PRESTARLE CUIDADO O FALLANDO EN QA (1% íntegro, 99% no íntegro)	0.9911	0.0089

Fuente: Elaboración propia

De esta tabla destaca el hecho de que para el caso original (es decir, con 60 % de éxito en la construcción si se atiende el QA de forma intermedia) la probabilidad de obtener un pilote no íntegro ronda en 0.36% (véase la línea del medio en la Tabla 4). No obstante, es notorio que si cambiamos la afectación de la calidad del pilote debido a no atender el QA a una probabilidad 99 % de obtener un pilote no íntegro, la probabilidad final de obtener realmente dicho pilote no íntegro de acuerdo con el árbol cambia a 0,8% (véase la última línea de la Tabla 4). Es decir es marginal respecto al caso anterior. Algo similar ocurre si se coloca que la probabilidad de obtener un pilote íntegro es 99% si se atiende completamente lo referido en el QA, ya que la probabilidad final del árbol cambia a 0,02% para que el pilote no quede íntegro. Este cambio también es marginal respecto al inicial.

Se nota entonces como lo comentado anteriormente referente a que el cumplimiento de las normativas QA no es un factor que realmente influye en la integridad estructural del pilote, siempre y cuando se cumplan todos los lineamientos para no fallar en la construcción del pilote.

4.5 Data para aplicación del árbol de decisión al hacer fallar las variables que afectan la integridad

Al fallar una variable, la probabilidad de obtener un pilote íntegro o no para esa variable en particular ya no es la misma que la utilizada para un pilote perfecto, debido a que al fallar afectan directamente la integridad estructural del pilote. Es por ello que para poder tener valores de referencia que fuesen válidos, se consultó a dos empresas con bastantes años en el mercado de construcción de pilotes, cual es la probabilidad de obtener un pilote bueno, según la falla en cada una de las variables asignadas.

Para obtener un valor más representativo, se combinó esto con la opinión conjunta entre el grupo de trabajo del TEG. A fin de obtener una probabilidad lo más certera posible, se asignó a cada uno de los valores suministrados un valor de confianza.

A continuación se muestra lo comentado:

Tabla 5. Probabilidad de pilote íntegro/no íntegro para falla de vaciado.

VARIABLE	PROB MALO/BUENO	SUMINISTRADO POR	CONFIANZA
VACIADO	0.99	Ing. Franco Nuzzo Pilotajes GFD 2009	0.7
	0.01		
	0.98	Ing. Alexander Rivas Pilotes Alexvar	0.2
	0.02		
	0.99	Tesisistas	0.1
	0.01		
PROB MALO	0.988		
PROB BUENO	0.012		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Probabilidad de pilote íntegro/no íntegro para falla de agregado.

VARIABLE	PROB MALO/BUENO	SUMINISTRADO POR	CONFIANZA
AGREGADO	0.96	Ing. Franco Nuzzo Pilotajes GFD 2009	0.7
	0.04		
	0.95	Ing. Alexander Rivas Pilotes Alexvar	0.2
	0.05		
	0.95	Tesisistas	0.1
	0.05		
PROB MALO	0.957		
PROB BUENO	0.043		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Probabilidad de pilote íntegro/no íntegro para falla de asentamiento y vibrado

VARIABLE	PROB MALO/BUENO	SUMINISTRADO POR	CONFIANZA
ASENTAMIENTO Y VIBRADO	0.9	Ing. Franco Nuzzo Pilotes GFD 2009	0.7
	0.1		
	0.87	Ing. Alexander Rivas Pilotes Alexvar	0.2
	0.13		
	0.85	Tesisistas	0.1
	0.15		
PROB MALO	0.889		
PROB BUENO	0.111		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Probabilidad de pilote íntegro/no íntegro para falla de verticalidad del acero

VARIABLE	PROB MALO/BUENO	SUMINISTRADO POR	CONFIANZA
VERTICALIDAD DEL ACERO	0.85	Ing. Franco Nuzzo Pilotes GFD 2009	0.7
	0.15		
	0.7	Ing. Alexander Rivas Pilotes Alexvar	0.2
	0.3		
	0.75	Tesisistas	0.1
	0.25		
PROB MALO	0.81		
PROB BUENO	0.19		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Probabilidad de pilote íntegro/no íntegro para falla de verticalidad del hoyo.

VARIABLE	PROB MALO/BUENO	SUMINISTRADO POR	CONFIANZA
VERTICALIDAD DEL HOYO	0.75	Ing. Franco Nuzzo Pilotes GFD 2009	0.7
	0.25		
	0.7	Ing. Alexander Rivas Pilotes Alexvar	0.2
	0.3		
	0.65	Tesisistas	0.1
	0.35		
PROB MALO	0.73		
PROB BUENO	0.27		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Probabilidad de pilote íntegro/no íntegro para falla de lavado de pozo.

VARIABLE	PROB MALO/BUENO	SUMINISTRADO POR	CONFIANZA
LAVADO DEL POZO	0.6	Ing. Franco Nuzzo Pilotajes GFD 2009	0.7
	0.4		
	0.8	Ing. Alexander Rivas Pilotes Alexvar	0.2
	0.2		
	0.7	Tesisistas	0.1
	0.3		
PROB MALO	0.65		
PROB BUENO	0.35		

Fuente: Elaboración propia.

4.6 Aplicación y resultados del árbol de decisión para estimación de probabilidad de daño estructural cuando fallan las variables

Se partió del árbol de decisión ya calibrado como ya se explicó anteriormente, para un nivel de QA intermedio y un excelente nivel de ejecución constructiva, es decir sin equivocaciones en ninguna de las variables. Con ello se procedió a colocar las probabilidades de pilote íntegro/no íntegro de cada variable individualmente (un análisis de árbol para cada una, ubicado en anexos 1), que fueron estimadas con base en la opinión de los tesisistas y dos ingenieros (dichas probabilidades se muestran en las tablas del 5 al 10), obteniéndose lo presentado en la tabla siguiente:

Tabla 11. Probabilidad de pilote íntegro y no íntegro con las diferentes fallas de variables.

FALLA	PROB PILOTE INTEGRO	PROB PILOTE NO INTEGRO
LAVADO DE POZO	0.864	0.136
VERTICALIDAD DEL HOYO	0.848	0.152
VERTICALIDAD DEL ACERO	0.831	0.169
ASENTAMIENTO	0.815	0.185
AGREGADO	0.801	0.199
VACIADO	0.795	0.205

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos se puede apreciar que los factores más importantes a la hora de la afectación de la integridad estructural de un pilote ocurren por problemas relacionados con el concreto, es decir, deficiencias en la mezcla o en la forma del vaciado.

Como se observa, el factor que más afecta la integridad de un pilote es la aplicación del método de vaciado incorrecto, reduciendo la probabilidad de obtener un pilote integro a un valor de 79.5%. Sin embargo, es de hacer notar que todas las fallas reducen considerablemente la probabilidad de obtener un pilote integro, y por tanto debe tenerse mucho cuidado en el momento de la ejecución para asegurar de la obtención de las probabilidades de éxito más altas posibles.

El lavado del pozo es la variable que menos afecta a la integridad, debido a que por las opiniones de los ingenieros consultados y a la bibliografía encontrada, por muy contaminado que este el lodo en el pozo, siempre la columna de concreto en un pilote de tamaño normal es capaz de desplazarlo sin mayores problemas, es decir, de manera que no se formen cavernas.

4.7 Aplicación y resultados del árbol de decisión para estimación de probabilidad de daño estructural cuando fallan las variables más influyentes al mismo tiempo

Utilizando las variables más influyentes en la afectación de la integridad (agregado, asentamiento, vaciado), y tomando en cuenta que todas ellas son atribuibles al momento de realizar la mezcla de concreto o la colocación de la misma, se aplicó el árbol de decisión nuevamente como se explica en la sección 4.6, combinando la probabilidad de falla de ambas variables. Obteniendo lo siguiente:

Tabla 12. Probabilidad de pilote bueno/malo para falla de dos variables.

FALLA	PROB PILOTE INTEGRO	PROB PILOTE NO INTEGRO
AGREGADO-VACIADO	0.324	0.676
AGREGADO-ASENTAMIENTO	0.372	0.628

Fuente: Elaboración propia.

Es de hacer notar que cuando la falla se presenta en dos variables con relación, la probabilidad de obtener un pilote integro se reduce drásticamente, alcanzando una reducción que llega hasta el 32.4%. Cuando se presentan estos casos prácticamente 7/10 pilotes construidos presentarán problemas de integridad, lo cual es gravísimo y debe tenerse muy en cuenta.

Aclaratoria

Un aspecto muy importante al que se debe hacer referencia es que las empresas de pilotaje muy comúnmente presentan un record histórico de pilotes malos respecto al total de pilotes construidos en el que no discriminan la ocurrencia de dichos pilotes defectuosos, es decir, no presentan la historia de cada obra en particular.

Por ejemplo, una empresa de pilotaje nos dice que su record es de 2 pilotes malos por cada 10.000, teniendo entonces una probabilidad de fracaso de 0.02%. Ahora bien lo que

Propuesta para norma de aceptación y rechazo de lotes de pilotes.

no nos dicen es que esos dos pilotes malos fueron contruidos en un lote de 100 pilotes en una obra en particular. Teniendo esto en cuenta se sabe que la probabilidad de fracaso real es de 2%, la cual es una probabilidad alta y muy diferente a la que presentaban en su record histórico.

Además con lo demostrado en este TEG se sabe que dependiendo de las condiciones constructivas de cada obra en particular las probabilidades de obtener pilotes íntegros puede verse seriamente afectada.

Es por ello que no se recomienda la utilización del record histórico de las empresas de pilotaje ni siquiera si muestran discriminación. Estos índices históricos solo deben utilizarse como referencia de calidad de la empresa.

Para hacer más énfasis se presentara un ejemplo:

Ejemplo

Se tiene un lote de 100 pilotes que fueron contruidos por una empresa que presenta un record histórico de calidad de 5 pilotes no íntegros cada mil pilotes, el cual es un record excelente. Además se sabe que según el inspector de obra esos 100 pilotes se construyeron con un asentamiento de la mezcla de concreto deficiente.

Con estos datos se sabe que aplicando una distribución binomial Ec.1, la probabilidad de ocurrencia de al menos un pilote con problemas de integridad estructural si presta atención al record histórico de ejecución de la empresa será:

$$F(X = 0) = \binom{100}{0} * \left(\frac{5}{1000}\right)^0 * \left(1 - \frac{5}{1000}\right)^{100-0} = 0.606$$

$$Prob \text{ de encontrar al menos un pilote con problemas} = 1 - 0.606 = 0.394$$

Ahora bien, siguiendo la observación del inspector, se tiene que al aplicar nuevamente la distribución binomial con la equivocación de la obra en particular, la probabilidad de encontrar al menos un pilote con problemas de integridad estructural será:

$$F(X = 0) = \binom{100}{0} * (0.185)^0 * (1 - 0.185)^{100-0} = 0$$

$$Prob \text{ de encontrar al menos un pilote con problemas} = 1 - 0 = 1$$

Queda evidenciado que al usar el record histórico de la empresa se obtiene una probabilidad de conseguir al menos un pilote malo de 39.4% por lo que si se confía en este resultado se está incurriendo en un error, ya que al comprobar con la probabilidad de ocurrencia de la obra en particular, se obtiene una probabilidad de conseguir al menos un pilote malo del 100%.

4.8 Identificación de las variables que afectan capacidad portante de un pilote

La selección de variables que afectan a la capacidad portante de un pilote aquí mostradas, provienen tanto de la experiencia profesional de nuestro tutor como de la bibliografía consultada.

Los factores más importantes que afectan la capacidad portante de un pilote excavado tienen estrecha relación con la forma de desarrollo de la capacidad del mismo, estas son:

- Adherencia de las paredes al fuste del pilote

El fuste del pilote debe quedar bien adherido a las paredes del agujero para que la capacidad por fricción pueda desarrollarse correctamente. La principal razón que hace que esto no suceda de forma correcta, es la formación de películas de lodo, tanto bentoníticos como de otros materiales alrededor del perímetro del fuste del pilote en longitudes parciales o en la totalidad de la profundidad del pilote.

Esto ocurre cuando al terminar de ejecutar la perforación el lodo contaminado no es removido y queda un lodo de mala calidad que afecta el desarrollo de la fricción, por tanto el hoyo debe ser lavado de los lodos contaminados. Cabe destacar que el mal lavado también puede afectar la integridad estructural como ya se mencionó.

- Asiento de la punta del pilote en el terreno

Durante la excavación de un pilote en suelos arenosos es inevitable que por los procesos aplicados se contaminen los lodos utilizados, y en caso de arenas gruesas a medias la misma sedimento y termine en la punta del pilote. Esto también puede ocurrir en pilotes excavados sin lodos por los choques contra las paredes de las perforadoras.

Esto hace que en la punta del pilote se generen especie de asientos blandos de material arenoso, que hacen que el mismo deba asentarse excesivamente para alcanzar terreno firme antes de empezar a desarrollar capacidad de punta.

- Integridad estructural del pilote

La integridad estructural de un pilote influye directamente al desarrollo de la capacidad portante, ya que para estructuras normales, es decir para asentamientos esperados y deseados de una pulgada o menos, la capacidad de punta es la que menos se ha desarrollado en relación a su capacidad última, pero aporta más en cantidad, mientras que la de fuste, que ya está totalmente desarrollada aporta menos cantidad de carga.

Ahora bien, sabiendo que el fuste se desarrolla completamente en estos niveles de asentamiento, es importante acotar que como las malformaciones estructurales generalmente afectan al fuste por la formación de cavernas y oquedades, se debe prestar mucha atención a las variables que influyen en la integridad, ya que de esto no estar

correcto el pilote deberá asentarse mucho más de lo esperado por no contar con el aporte del fuste, lo cual no es lo deseado.

4.9 Selección de data histórica base para aplicación de árbol estadístico

Sabiendo que estas variables son las que afectan al desarrollo de la capacidad de un pilote, y teniendo en cuenta que se tiene la data histórica ubicada en el trabajo de los alemanes Klingmuller, Oswald and Kirsch, Fabian, “A quality and safety issue for cast in place piles with low strain integrity testing in Germany”, (1998), en donde se descubrió que aun construyendo los pilotes con un buen nivel de ejecución en obra existe una probabilidad de 0.0066 de que los mismos no desarrollen su capacidad, se utilizó la misma para poder asignar valores bien referenciados, que relacionaran las variables presentadas en el punto anterior con sus respectivas probabilidades de obtener que desarrollen su capacidad y pilotes que no desarrollen su capacidad, desde el punto de vista de capacidad admisible.

4.10 Comprobación de variables que influyen en la capacidad portante de un pilote con base en la data histórica

Teniendo en cuenta que la data presentada por los alemanes es muy representativa del asunto, y además las variables que afectan al desarrollo de la capacidad portante de un pilote son las presentadas, se procedió a elaborar nuevamente un diagrama de Bernoulli o de árbol, para representar el peso de cada una de las variables sobre la afectación de la capacidad portante.

Es decir, sabiendo que la probabilidad de que un pilote bien ejecutado no desarrolle su capacidad portante es de 0.0066, se fueron asignando valores de probabilidad de desarrollar y no desarrollar la capacidad a cada una de las variables basándose en la opinión de los autores consultados y la de los tesisistas, para lograr una calibración del árbol.

El objetivo de la calibración es ajustar las probabilidades de cada pregunta del árbol hasta obtener la probabilidad de un pilote que no desarrolla capacidad igual a la utilizada como referencia de los alemanes Klingmuller, Oswald and Kirsch, Fabian, “A quality and safety issue for cast in place piles with low strain integrity testing in Germany”, (1998). Las probabilidades correspondientes a cada una de las ramas del árbol se encuentran en la Tabla 13. Es oportuno destacar que esas probabilidades fueron ajustadas todas considerando que si se ejecutan adecuadamente en campo, se obtiene por las secuencias seleccionadas para agrupar el no desarrollo de la capacidad del pilote la probabilidad tomada de la literatura de los alemanes. Esto se incluye en el Anexo 2.

La probabilidad de que un pilote integro estructuralmente desarrolle su capacidad portante, fue extraída del modelo estadístico de la integridad estructural visto en los puntos anteriores, es decir, un pilote integro tiene 99.63% de probabilidad de que desarrolle su capacidad y pilote no integro 0.364% de probabilidad de que desarrolle su capacidad. Esto

porque se tomó en consideración que la probabilidad de que un pilote quede integro estructuralmente cumpliendo todas las pautas constructivas y manteniendo un nivel de QA intermedio, es la misma probabilidad de que el pilote desarrolle su capacidad portante. Ello por no tener más valores de referencia que permitan un mejor ajuste.

Se ajustó el árbol en base a estas premisas, variando como se menciona las probabilidades de obtener un pilote que desarrolle o no la capacidad para cada variable, y agrupando las rutas del árbol que conducen hacia un pilote que alcance su capacidad y un pilote que no alcance su capacidad, tomando en cuenta todas las variables asociadas del proceso, hasta que se logró calibrar. Tal como se aprecia en las siguientes tablas:

Tabla 13. Probabilidades de obtener un pilote que desarrolla o no su capacidad para cada variable ya ajustadas.

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

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Resultados de aplicación del árbol de decisión para cada ruta.

Hay 4 preguntas, podemos dividir el escenario considerando: #casos			Probabilidad
0	malas -Pilote excelente (alcanza su capacidad holgadamente)	1	0.852485616
1	mala - Pilote bueno (alcanza su capacidad sin problemas)	3	0.141409152
2	malas - Pilote aceptable (alcanza su capacidad muy justo)	3	0.006084848
3	malas - Pilote malo (no alcanza la capacidad necesaria por poco)	1	2.0384E-05
Son 8 estados posibles			
			1.00

Fuente: Elaboración propia.

Este procedimiento, así como sus resultados son presentados en los anexos parte 2.

Luego de aplicar el árbol de decisión y agrupar las rutas que conducen hacia un pilote que desarrolla su capacidad o no, se nota que corresponde con el valor presentado por los alemanes, por lo que se considera bien calibrado. En la Tabla 15 a continuación se aprecia lo comentado:

Tabla 15. Probabilidad de un pilote desarrolle/ no desarrolle su capacidad arrojada del árbol de decisión.

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

Fuente: Elaboración propia.

4.11 Aplicación y resultados del árbol de decisión para estimación de probabilidad de desarrollo de capacidad portante cuando fallan las variables

Ya con el modelo calibrado, se procedió a variar las probabilidades individuales de cada una de las variables para estudiar el comportamiento o peso de cada una, como se muestra a continuación:

1. Cuando el pilote no está integro estructuralmente, se invirtieron los valores de probabilidad de esta rama, y las probabilidades de las otras dos variables no se modificaron.
2. Cuando el pilote está integro estructuralmente pero falla alguna de las otras variables, entonces se invirtieron los valores de probabilidad para esas variables pero la de integridad no se modificó del original.

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 16. Probabilidad de pilote desarrolla/no desarrolla de capacidad portante según fallas.

CASO	PROB PILOTE DESARROLLA CAPACIDAD	PROB PILOTE NO DESARROLLA CAPACIDAD
PILOTE PERFECTO (INTEGRO Y ADEMÁS LIMPIEZA DE FONDO Y LAVADO CORRECTAMENTE HECHOS)	0.994	0.0061
FALLA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL	0.856	0.144
FALLA LAVADO DE POZO	0.922	0.078
FALLA LAVADO DE PUNTA	0.932	0.068
FALLA LAVADO GENERAL (PUNTA Y POZO)	0.144	0.856

Fuente: Elaboración propia

Se aprecia como si existe una falla de integridad estructural, la probabilidad de que el pilote desarrolle su capacidad portante se reduce de 99.4% a 85.6%, así como también que esta es la variable más importante de las tres por ser la que presenta más reducción de la probabilidad de desarrollar capacidad portante. Además se nota que si no se presta atención al lavado del pozo y de la punta al mismo tiempo la probabilidad de que el pilote desarrolle su capacidad en asentamientos admisibles se reduce drásticamente porque se forman colchones de arena en la punta y se forman películas de lodo en el fuste que disminuyen la resistencia y requieren de más asentamiento.

Es de hacer notar que un pilote que no esté integro estructuralmente no presenta la suficiente certeza de desarrollar su capacidad portante en asentamientos normales sino que necesitara de asentamientos excesivos que no son admitidos por las estructuras. Por tanto tomando en cuenta este hecho se puede afirmar que luego de realizar una prueba de integridad estructural que arroje como resultado un pilote de buena estructura que no presente ningún tipo de malformaciones, existe un alto nivel de confianza de que el mismo lograra lo que estaba estipulado en cuanto a su capacidad portante en asentamientos admisibles. Hay ocasiones en donde el pilote se puede atrasar en el desarrollo de su capacidad, pero muy probablemente la alcanzará a un asentamiento mayor.

4.12 Estimación de probabilidad de desarrollo de la capacidad portante de un pilote

Ya conociendo las variables que afectan a la capacidad portante de un pilote y además su respectiva participación en cuanto a importancia en ello con lo explicado en los anteriores puntos, se procede a estimar la probabilidad de que un pilote alcance su capacidad portante basado en ensayos de baja energía.

Esto estará apoyado además de en ensayos de baja energía, sobre las curvas desarrolladas por los investigadores Reese y O'Neill, y sobre la investigación realizada por los alemanes.

Para la estimación, se siguieron los pasos mencionados a continuación:

1. Estimación de la capacidad portante del pilote haciendo uso de las pautas mencionada en el capítulo 2. Se estiman las capacidades de fuste “Q_{fu}” y de punta “Q_{pu}”.
2. Fijación de un asentamiento (deseado) no mayor de 3mm, ni menor de 1mm, utilizando la tabla 17, para controlar el hecho que las pruebas de baja energía se mantienen en rango estático para asentamientos pequeños, y entonces para cubrir cualquier eventualidad se requiere de un espacio de seguridad.

Tabla 17. Asentamientos recomendados de acuerdo al diámetro del pilote y la relación de estos mismos parámetros en %.

Diámetro (mm)	Asentamiento (mm)	A/D (%)
400	1.00	0.25
500	1.00	0.20
600	1.50	0.25
700	2.00	0.29
800	2.00	0.25
900	2.00	0.22
1000	2.00	0.20
1100	2.50	0.23
1200	2.50	0.21
1300	3.00	0.23
1400	3.00	0.21
1500	3.00	0.20

Fuente: Álvarez, A y Alfonzo, F, “Estimación de las capacidades de fuste y punta en pilotes mediante ensayos dinámicos de baja energía”, (2018).

3. En base al asentamiento deseado se establecen las fracciones de participación de cada uno de los aportes de la capacidad portante (fuste y punta), utilizando los gráficos desarrollados por los investigadores Reese y O’Neill teniendo en cuenta que para abarcar el rango de comportamientos se utilizara la curva “promedio” propuesta por ellos.

Estas fracciones de participación son “A” para el fuste y “B” para la punta

4. Cálculo de la capacidad (fuste más punta) según esas fracciones de participación respecto a la capacidad última, para el nivel de asentamiento deseado (el que se escoge menor a 3mm).

$$Q_t = A * Q_{uf} + B * Q_{up} \quad Ec. 17$$

Cabe destacar que “Qt” es para el nivel de asentamiento que se desea.

5. Con la capacidad estimada, en teoría se le debe dar un golpe de baja energía con un martillo al pilote y este debe asentarse lo que se esperaba. Ahora bien, se sabe que según Álvarez, Andrés y Alfonzo, Franchesca, “Estimación de las capacidades de punta y fricción de pilotes mediante pruebas dinámicas de baja energía”, (2018), existen distintas perdidas de energía por la eficiencia del martillo y la disipación en el suelo por el amortiguamiento, por tanto si se utiliza esta capacidad estimada para el cálculo de la energía del martillo, la carga que recibe el pilote efectivamente, no será la misma sino una mucho menor.

Es por ello que siguiendo la recomendación de los mismos autores citados en el párrafo anterior, se debe contar con equipos de medición de deformación en

el pilote y acelerómetros, que en conjunto puedan medir o cuantificar la fuerza entregada al pilote con veracidad. Además, por la incertidumbre que existe en las pérdidas, que varían con el tipo de suelo en el perfil geotécnico y el tipo de martillo, se debe tomar la precaución de ajustar Q_t para tener más precisión al alcanzar el asentamiento deseado.

La altura de caída del martillo se calcula para Q_t ajustada según lo indicado por los autores mencionados, en general no debe haber problemas con el asentamiento si las pérdidas son las típicas para este tipo de pruebas, se hace aplicando las siguientes ecuaciones:

$$Q_t * t = \frac{masa_{martillo}}{g} * V_{martillo} \quad Ec. 18$$

Donde t es el tiempo de viaje de la onda dentro del pilote y se estima con:

$$t = \frac{2 * L}{C} \quad Ec. 19$$

L corresponde a la longitud del pilote y C es la velocidad de la onda en el concreto igual a 4000m/s.

De la ec 18 se despeja la velocidad de impacto del martillo y con ello se estima el tiempo de caída con la siguiente ecuación:

$$V_{martillo} = V_o + g * t \quad Ec. 20$$

Sabiendo que la velocidad inicial es cero por ser caída libre.

Luego con el tiempo de caída se estima finalmente la altura del martillo con:

$$h_{martillo} = V_o * t + \frac{1}{2} * g * t^2 \quad Ec. 21$$

6. Con esta altura estimada, se procede a golpear el pilote siguiendo el procedimiento indicado por los mismos autores. Si no se alcanza el asentamiento deseado se puede repetir el golpe con una altura similar o un tanto menor para lograr un asentamiento cercano al deseado. Se recomienda que si al dar una suma de golpes cualquiera, el asentamiento registrado se encuentra muy cercano al deseado, se detenga el procedimiento y prosiga con los puntos siguientes.

7. Una vez alcanzado el asentamiento deseado, se suma la cantidad de fuerza aplicada en cada golpe medida con los aparatos, para obtener la energía realmente aplicada sobre el pilote sumando el número de golpes.
8. Con esta fuerza aplicada sobre el pilote, y el asentamiento medido con los aparatos respectivos, se hace uso de los gráficos propuestos por los investigadores Reese y O'Neill, contruidos para el pilote específico en estudio en su carga total (en los 3 rangos, mínimo, promedio y máximo), ubicando así el punto que se acaba de obtener sobre estas curvas.
9. Se procede a establecer en el asentamiento medido, el valor mínimo, medio y máximo sobre los gráficos contruidos de carga total del pilote. Con ello, y el punto ubicado en el punto 8 se establece la probabilidad de que el pilote alcance la capacidad portante con base en el siguiente criterio:
 - Si el punto ubicado en el inciso 8 está por encima del 50% del rango, existe una muy alta probabilidad de que el pilote alcance su capacidad portante para los asentamientos admisibles.
 - Si el punto ubicado en el inciso 8 está por encima del 15% y por debajo del 50% del rango, existe una buena probabilidad de que el pilote alcance su capacidad portante para los asentamientos admisibles.
 - Si el punto ubicado en el inciso 8 está por debajo del 15% del rango, existe una probabilidad baja a muy baja de que el pilote alcance su capacidad portante para los asentamientos admisibles. En este caso la estructura deberá asentarse un poco más para alcanzar la capacidad admisible.

Estos rangos han sido tomados por los autores ya mencionados, tomando en cuenta que existe mucha incertidumbre en todo el proceso de estimación de esta probabilidad, por estar tantos factores involucrados.

Existe otra forma de estimar esta probabilidad sin la utilización de equipos especiales de medición de las fuerzas aplicadas (el asentamiento sí debe ser medido), tal como se muestra a continuación:

1. Seguir los pasos del método explicado anteriormente hasta el número 4.
2. Como en este caso no se cuenta con equipos de medición de fuerza, se realiza una aproximación de la fuerza entregada al pilote en cada golpe, utilizando la carga “Qt” ajustada por las pérdidas que se esperan en el proceso.
3. Seguir el paso número 6 del método anterior.

4. Con el número de golpes dados al pilote para alcanzar el asentamiento deseado se procede a establecer la cantidad de fuerza entregada realmente al pilote teniendo en cuenta que cada golpe transmite Q_t ajustada por pérdidas.
5. Seguir el resto de los pasos del método anterior a partir del 8.

Cabe destacar que este es un método muy aproximado y que solo debe utilizarse en casos muy especiales en donde no se cuente con los equipos especiales necesarios, o cuando se requiera una primera aproximación por la empresa constructora de pilotes para estimar si sus pilotes podrían presentar problemas para alcanzar las cargas de diseño.

4.13 Ejemplo de estimación de la capacidad portante

Se tiene un pilote de 1m de diámetro y 15 metros de longitud fundado en un perfil geotécnico de arcillas. El mismo desarrolla una capacidad última teórica para la punta de 150ton y para el fuste de 60ton. Peso del martillo 1000 kg. Solo se cuenta con medición de asentamiento.

A) Entrando en la tabla 17 se obtiene que para 1000mm; $A/D\% = 0.20$.

B) Para las gráficas de fricción y punta se procede a buscar el porcentaje de participación por lo cual:

Para fricción:

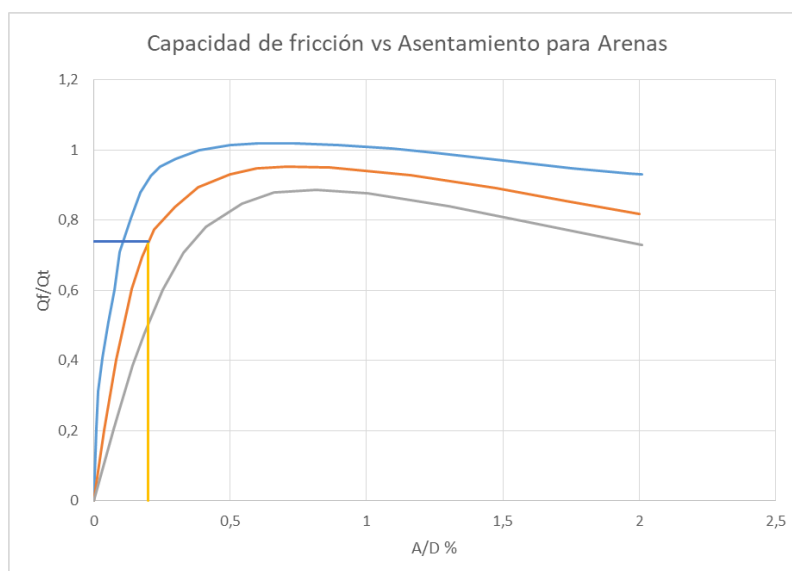


Figura 39. Ejemplo de desarrollo de la capacidad para la fricción.

Fuente: Elaboración propia.

$$\frac{Q_f}{Q_{fu}} = 0,74 = A$$

Para la punta:

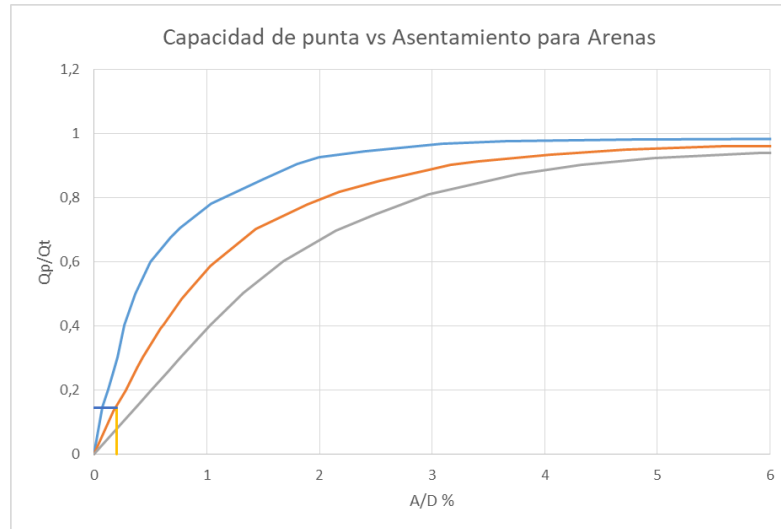


Figura 40. Ejemplo de desarrollo de la capacidad para la punta.

Fuente: Elaboración propia.

$$\frac{Q_p}{Q_{pu}} = 0,145 = B$$

C) Utilizando la Ec 17 se obtiene:

$$Q_t = 0,74 * 60 + 0,145 * 150 = 66,15 \text{ t}$$

D) Aplicando la Ec 19 y 18

La carga de 66,15 t se ajusta por las pérdidas de impedancia y por el martillo, con lo cual se aumenta un 45%, para este caso.

$$t = \frac{2 * 15}{4000} = 0,0075 \text{ s}$$

$$66,15 * 0,45 * 1000 * 0,0075 = \frac{1000}{9,81} * V_{martillo}$$

$$V_{martillo} = 2,21 \text{ m/s}$$

E) Se aplica la Ec 20

$$2,21 = 0 + 9,81 * t$$

$$t = 0,23 \text{ s}$$

F) Con la Ec 21 se logra obtener la h del martillo

$$h_{martillo} = 0 * 0,23 + \frac{1}{2} * 9,81 * 0,23^2 = 0,25 \text{ m}$$

G) Con la altura del martillo se procedió a golpear el pilote en campo, obteniendo con 8 golpes un asentamiento de 1,9 mm.

H) Fuerza total entregada al pilote

$$F = 8 * 66,15 * 0,25 = 132,3 \text{ t}$$

I) Se procedió a estimar las cargas a partir de las curvas de Reese y O'Neill para el pilote en particular de 1000mm de diámetro, carga última de fricción de 60 t y carga última de punta 150 t. Además con el asentamiento medido en campo y la carga entregada al pilote, se ubicó este punto en el gráfico representado con una línea roja.

J) Se ubicó el rango entre el 15% y el 100%, marcados con líneas negras.

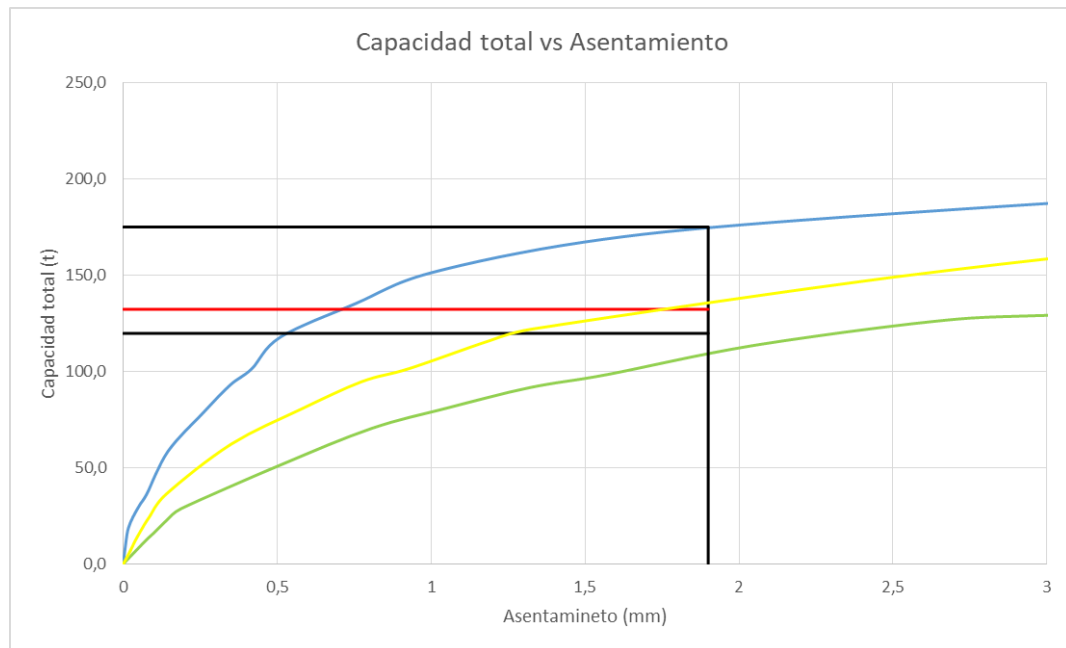


Figura 41. Ejemplo de estimación de desarrollo de la capacidad.

Fuente: Elaboración propia.

- K) Se observa que la línea roja se ubica por encima de la primera línea negra, lo que indica que el pilote presenta una carga desarrollada por encima del 15% del valor mínimo, por lo tanto la probabilidad de que el pilote alcance su capacidad para el asentamiento admisible es buena.

4.14 Elaboración de plan de inspección para aceptación y rechazo de pilotes

A fin de establecer un plan de inspección justo para ambas partes, tanto contratista como contratante, se ha fijado un plan basado en atributos, debido a que un plan por variables involucraría el establecimiento de distintos aspectos que sirvan como criterio de aceptación y rechazo, cosa que en los pilotes por ser elementos bajo tierra es bastante complicado y la incertidumbre sería muy alta.

El único atributo de este plan será la integridad estructural del pilote, ya que es lo único que se puede verificar con pruebas sencillas de bajo costo y que no requieren un tiempo excesivo de ejecución, por lo que la obra puede continuar sin interrupciones.

Esto también se compatibiliza con lo expuesto en los puntos anteriores en donde se demuestra que los pilotes que están íntegros estructuralmente la probabilidad de que el mismo desarrolle su capacidad portante para el asentamiento de proyecto de la estructura es muy alta y se puede aproximar al 100% de los casos si el estudio de suelos fue bien hecho y también así los cálculos en el diseño. Es decir, la aceptación de un lote en donde los pilotes estén íntegros estructuralmente también sugiere que en general los mismos tendrán una buena probabilidad de desarrollar su capacidad para los asentamientos admisibles.

Teniendo en cuenta que un pilote defectuoso representa un alto riesgo tanto económico como también en algunos casos especiales de pérdidas de vida humanas, se ha limitado el valor aceptable de calidad AQL a 1%.

El plan de inspección se ha confeccionado utilizando como base los planes propuestos por Military standard 105E, “Sampling procedures and tables for inspection by attributes”, (1989), provenientes de las curvas normales de operación.

Se hizo una adaptación de los planes de muestreo simple allí propuestos, teniendo en cuenta el alto riesgo que representa un pilote defectuoso, se ha tomado una combinación entre inspección normal e inspección estricta para un nivel de inspección general. Los niveles de riesgo de contratista o “ α ” y contratante o “ β ” no se han modificado estableciéndose entre 5-10%. La diferencia entre el plan normal y el estricto es la fijación de un nivel límite de calidad más o menos permisivo, dependiendo del caso.

La adaptación que se hizo tomo en cuenta que para lotes grandes utilizando inspección normal los criterios de aceptación y rechazo son muy permisivos, mientras que si se utiliza

inspección estricta, estos pueden ser controlados de mejor forma. Para los lotes pequeños no se ha efectuado modificación alguna, ya que el plan de inspección normal se adapta perfectamente a los requerimientos.

El plan de inspección propuesto se presenta a continuación en forma de tabla:

Tabla 18. Plan de inspección por atributos para aceptación y rechazo de lotes de pilotes.

Tabla maestra para criterios de aceptación y rechazo de pilotes en muestreo simple												
Tamaño de lote	Tamaño de muestra	Nivel de calidad aceptable (AQL) en porcentaje										
		0.010	0.015	0.025	0.040	0.065	0.10	0.15	0.25	0.40	0.65	1.0
		Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
2 a 8	2	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
9 a 15	3	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
16 a 25	5	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
26 a 50	8	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
51 a 90	13	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
91 a 150	20	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
151 a 280	35	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
281 a 500	50	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
501 a 1200	80	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
1201 a 3200	125	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
3201 a 10000	200	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
10001 a 35000	315	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
35001 a 150000	500	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
1510001 a 500000	800	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
500001 y mas	1250	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

Fuente: Elaboración propia

Ac =Número de pilotes no íntegros máximo para aceptar el lote.

Re=Número de pilotes no íntegros a partir del cual se rechaza el lote.

⇧ Utilizar los criterios de Ac y Re del primer plan por encima de la flecha, pero el tamaño de muestra se mantiene.

⇩ Utilizar los criterios de Ac, Re y tamaño de muestra del primer plan por debajo de la flecha. Sí el tamaño de muestra es mayor al tamaño del lote, efectuar inspección 100%.

En la tabla mostrada se pueden apreciar los criterios de aceptación y rechazo para cada tamaño de lote de pilotes en base a la realización de PIT a la muestra asociada, dependiendo del AQL fijado.

Los valores de AQL serán fijados, dependiendo de la importancia de la estructura, según lo mostrado en la siguiente figura:

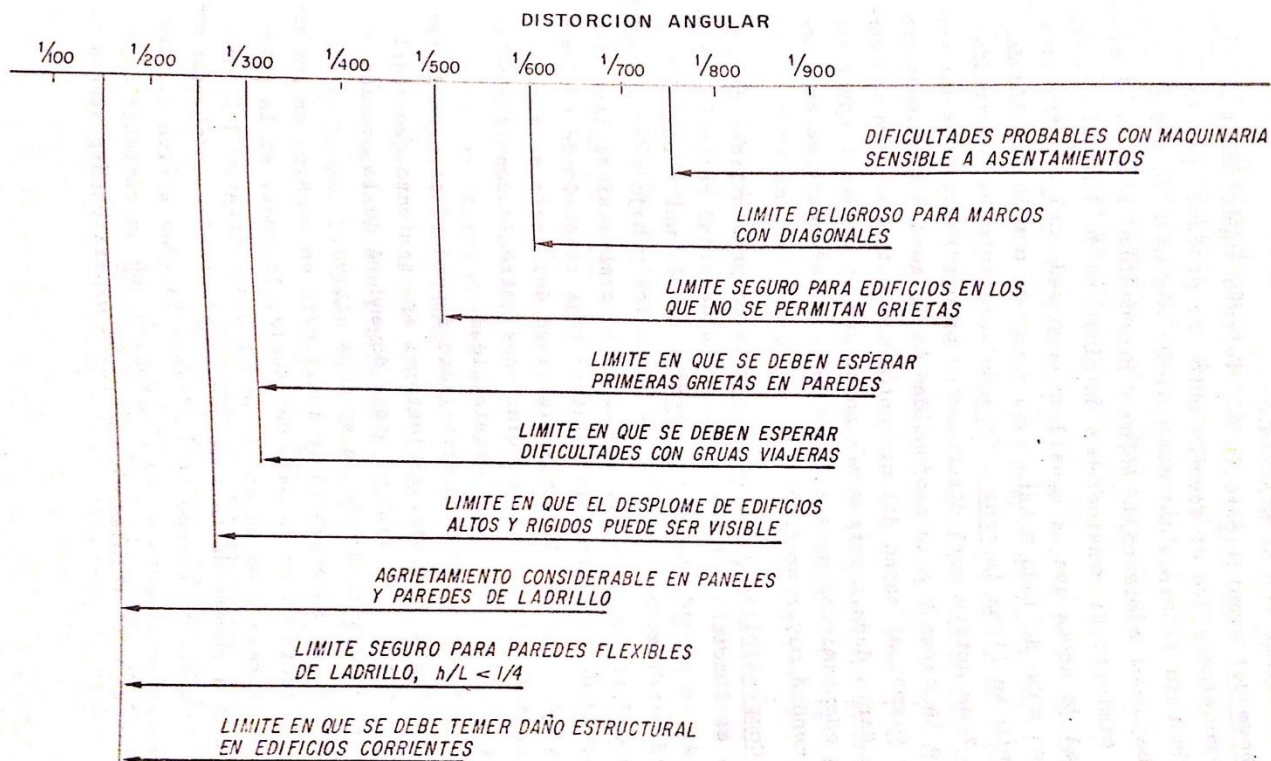


Figura 42. Distorsión angular permitida según estructura.

Fuente: Pérez G. Gustavo y Carrillo P. Pedro, “Ingeniería de Fundaciones”, (1981).

Con los criterios mostrados en la figura, se ha construido la siguiente tabla:

Tabla 19. Valores de AQL según la estructura en estudio.

Tipo de estructura	Rango de AQL	AQL recomendado
Edificación sensible a asentamientos. No se permite formación de grietas (Distorsión angular menor a 1/500).	0.010-0.065	0.040
Edificación en donde se permite la aparición de grietas (Distorsión angular hasta 1/300).	0.065-0.40	0.25
Edificación no sensible a asentamientos. Se permite la formación de grietas (Distorsión angular hasta 1/150).	0.40-1.0	0.65

Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que el rechazo de lotes de pilotes es un tema muy complejo con muchas implicaciones sobretodo económicas, ya que a diferencia de cualquier otro elemento este no puede demolerse y rehacerse, sino que debe ser sustituido o compensado con la construcción de otros que lo acompañen dependiendo de la gravedad del asunto. También a la hora de compensar estos elementos pueden producirse problemas en los cabezales, debido a que no hay suficiente espacio y no se puede cumplir la separación mínima entre los pilotes, por ello buscar la solución estructural a asunto no siempre es una tarea fácil y en ciertas ocasiones se debe modificar el diseño.

Los pasos para utilizar este plan de inspección propuesto son los siguientes:

1. Identificar el tamaño del lote de pilotes en campo.
2. Utilizar la tabla 18 presentada, ubicando el tamaño del lote ya identificado.
3. Para ese tamaño de lote verificar cual es el tamaño de la muestra a ser tomada aleatoriamente con la tabla 18.
4. Ubicar la muestra de tamaño indicado en el campo, utilizando el método de muestreo aleatorio simple.
5. Definir el valor de AQL a ser utilizado dependiendo de la importancia de la estructura o proyecto, según tabla 19.
6. Ubicar los criterios de aceptación y rechazo para las características ya establecidas en la tabla 18.

7. Con la muestra ya ubicada, se realiza la prueba de integridad estructural a cada uno de los pilotes.
8. Análisis de los resultados del PIT de acuerdo con lo indicado en las bases teóricas de este TEG para evitar errores en la interpretación de la prueba.
9. Verificación de cumplimiento de los criterios de aceptación y rechazo de acuerdo a los resultados obtenidos de las PIT. (Más adelante se explica el procedimiento).
10. Aceptación o rechazo del lote.

Con respecto al cumplimiento de los criterios de aceptación y rechazo (punto 9) pueden presentarse diferentes casos que deben ser estudiados, los cuales son:

- Número de pilotes defectuosos = Número Re del plan de inspección

Debido a que el lote no cumple con el criterio, se procede a repetir el procedimiento nuevamente, extrayendo la muestra ya ensayada de la población total de pilotes en el lote, para disminuir el espacio muestral y aumentar las probabilidades de hallar pilotes defectuosos a fin de verificar que no fue un evento fortuito.

Si nuevamente se encuentra que el criterio de aceptación no es cumplido, se rechaza el lote y se pasa a inspección 100% del mismo, procediendo a tomar las medidas necesarias para la solución de los problemas estructurales generados por los pilotes defectuosos que se encuentren.

En caso de cumplir el criterio de aceptación, el lote se acepta, pero se debe tomar las medidas necesarias para la solución del problema estructural generado por el o los pilotes defectuosos encontrados en la primera toma de muestras.

- Número de pilotes defectuosos > Número Re del plan de inspección

En este caso el lote es rechazado y se pasa a inspección 100% del mismo, procediendo a tomar las medidas necesarias para la solución de los problemas estructurales generados por los pilotes defectuosos que se encuentren. Esto debido a que existen problemas constructivos en la ejecución de los pilotes del lote.

- Número de pilotes defectuosos = Número Ac del plan de inspección

En este caso el lote es aceptado.

Nota: Si el lote es aceptado aun habiendo ubicado algún pilote defectuoso, se debe tomar las medidas necesarias para la solución del problema estructural generado por el o los pilotes defectuosos encontrados. Es decir, si el número Ac es 1 por ejemplo y se encuentra solo un pilote defectuoso en la toma de muestras, el lote es aceptado, pero se debe reparar ese pilote encontrado defectuoso.

Aclaratoria

Cuando se rechaza un lote, ello no quiere decir que todos los pilotes del lote se desechan. Lo que se está cuestionando con este sistema de inspección presentado es la forma de construcción de los pilotes, es decir, se rechaza la calidad constructiva de la empresa en particular. No obstante la solución a ello es simplemente que se debe hacer una inspección minuciosa del 100% de los pilotes para así asegurar la calidad del lote, ya que en este caso existe un problema constructivo que ocasiono la falla.

Esto con la finalidad de que las empresas mejoren su calidad constructiva bien sea en la misma obra en donde ya fue rechazado un lote o en nuevas obras a fin de garantizar la calidad de los pilotes.

Como los pilotes son elementos muy importantes para cualquier edificación y además por su naturaleza no pueden ser reemplazados porque es imposible extraerlos o hacerle reparaciones, cuando alguno es encontrado defectuoso bien sea en inspección 100% o durante la aplicación del plan de muestreo se debe buscar una solución estructural al problema en particular de cualquier forma posible. Cabe destacar que siempre deben cumplirse las separaciones mínimas entre pilotes en caso de que la solución sea añadir unos nuevos.

4.15 Ejemplos de aplicación del plan de muestreo elaborado

A continuación se presentan distintos ejemplos de aplicación del plan de muestreo propuesto para mejor entendimiento:

- Ejemplo Caso 1:

Se tienen 150 pilotes pertenecientes a la fundación de una estructura en donde se permite la aparición de algunas grietas.

$N=150$ pilotes; $AQL=0.25$ (obtenido de tabla 19)

Entrando en tabla 18, tenemos que:

$n=50$ (Primer plan de muestreo bajo la flecha); $Ac=0$; $Re=1$.

Los resultados del PIT aplicado a los 50 pilotes arrojan que 1 pilote presenta problemas de integridad estructural, por lo que es un caso 1.

Nuevo tamaño de lote $N'=150-50=100$ pilotes.

Entrando en tabla 18 con los datos presentados vemos que la muestra nuevamente es de 50 pilotes.

Los resultados del PIT aplicado a los 50 pilotes arrojan que no hay pilotes defectuosos, por lo tanto se acepta el lote, pero se debe encontrar una solución estructural al pilote encontrado con defectos.

- Ejemplo Caso 2:

Se tienen 500 pilotes pertenecientes a la fundación de una estructura sensible a los asentamientos.

$N=500$ pilotes; $AQL=0.040$ (obtenido de tabla 19)

Entrando en tabla 18, tenemos que:

$n=315$ (Primer plan de muestreo bajo la flecha); $Ac=0$; $Re=1$.

Los resultados del PIT aplicado a los 315 pilotes arrojan que 3 pilotes presentan problemas de integridad estructural, por lo que es un caso 2.

El lote es rechazado, se debe pasar a inspección 100% y se deben resolver los casos de pilotes defectuosos encontrados.

- Ejemplo Caso 3:

Se tienen 100 pilotes pertenecientes a la fundación de una estructura en la que se permiten grietas (no tienen restricción).

$N=100$ pilotes; $AQL=0.65$ (obtenido de tabla 19)

Entrando en tabla 18, tenemos que:

$n=20$ (Primer plan de muestreo bajo la flecha); $Ac=0$; $Re=1$.

Los resultados del PIT aplicado a los 20 pilotes arrojan que 0 pilotes presentan problemas de integridad estructural, por lo que es un caso 3.

Siguiendo los criterios establecidos, se acepta el lote.

CAPÍTULO 5: PROPUESTA DE NORMATIVA

En este capítulo se presentará la propuesta de normativa de aceptación y rechazo de lotes de pilotes en donde se considerarán todos los aspectos mencionados en el desarrollo de este TEG.

PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO PARA INSPECCIÓN POR ATRIBUTOS DE LOTES DE PILOTES

ÍNDICE GENERAL

Contenido

1. Objeto.....	1
2. Referencias normativas.....	1
3. Términos, definiciones y símbolos.....	1
3.1 Términos y definiciones.....	1
3.2 Símbolos y abreviaciones.....	3
4. Bases para la aplicación del plan.....	4
5. Extracción de muestras.....	4
5.1 Selección de la muestra.....	4
5.2 Momento de tomar la muestra.....	4
6. Plan de muestreo.....	4
7. Ejemplos de aplicación del plan de muestreo.....	8
8. Recomendaciones.....	9
9. Bibliografía.....	9

PRÓLOGO

La presente propuesta de normativa para aceptación y rechazo de lotes de pilotes es una adaptación de la norma para inspección por atributos MIL-STD 105E 1989.

1. OBJETO

1.1 Se busca especificar un sistema de muestreo para inspección por atributos de lotes de pilotes que sea acorde para las partes involucradas. Está basado en términos de nivel aceptable de calidad de aceptación o AQL por sus siglas en ingles.

El propósito es inducir al contratista a que mantenga un promedio de su proceso constructivo al menos tan bueno como el nivel aceptable de calidad fijado, a través de la presión económica y psicológica que involucra el rechazo de un lote de pilotes.

1.2 Los esquemas de muestreo designados en esta propuesta de normativa se pueden aplicar a solamente a pilotes.

2. REFERENCIAS NORMATIVAS

La presente propuesta de norma contiene disposiciones que al ser citadas en este texto, constituyen requisitos de la misma. Las normas citadas son:

- **MIL-STD 105E 1989**, Sampling procedures and tables for inspection by attributes
- **Covenin 3133-1 2001**, Procedimientos de muestreo para inspección por atributos.

3. TÉRMINOS, DEFINICIONES Y SÍMBOLOS

3.1 Términos y definiciones

Los términos y definiciones usados en esta propuesta de norma han sido tomados de la Norma Venezolana COVENIN 3133-1 2001, siendo aplicables los siguientes:

NOTA: Algunos de estos términos son citados directamente del COVENIN 3133-1 2001 y 3133-0, para fácil referencia, mientras que otros han sido redefinidos o definidos por primera vez.

3.1.1 Inspección

Actividad de medir, examinar, probar o calibrar uno o más características de un producto o servicio, comparando los resultados con requisitos especificados con el fin de establecer si se está conforme con estos, para cada una de las características.

3.1.2 Inspección por atributos

Un tipo de inspección donde el ítem es clasificado simplemente como conforme o no conforme con respecto a un requisito especificado o a un conjunto de requisitos especificados, o donde se cuentan el número de no conformidades en un ítem.

3.1.3 Lote de pilotes

Cantidad definida de pilotes, reunidos en un solo lugar.

3.1.4 Tamaño de lote

Numero de pilotes en un lote.

3.1.5 Plan de muestreo

Combinación de tamaño(s) de muestra a usarse, asociado con los criterios de aceptabilidad del lote.

3.1.6 Inspección normal

Uso de un plan de muestreo (3.1.5) con un criterio de aceptación y rechazo diseñado para asegurar una alta probabilidad de aceptación cuando el promedio del proceso es mejor que el nivel de calidad de aceptación AQL.

NOTA: Se usa la inspección normal cuando no hay razón de sospechar que el promedio del proceso no esté a un nivel aceptable.

3.1.7 Inspección estricta

Uso de un plan de muestreo (3.1.5) con un criterio de aceptación más estricto que aquel para un plan correspondiente para inspección normal (3.1.6)

NOTA: La inspección estricta se utiliza cuando se sospecha que existe una alta probabilidad de que el promedio del proceso está a una calidad peor al nivel de calidad aceptable.

3.1.8 Muestra

Tamaño representativo del lote estadísticamente que será tomado para el estudio de su aceptabilidad o rechazo.

3.1.9 Nivel aceptable de calidad (AQL)

El “Acceptable Quality Level” por sus siglas en inglés, se refiere al máximo percentil promedio defectuoso en el lote que puede ser considerado como aceptable sin que el producto resultante muestre un comportamiento riesgoso para la estructura.

Un percentil promedio es aquel que toma en cuenta los defectos que se encuentran repartidos en todo el lote, es decir, el AQL se basa en que existan defectos repartidos y no solamente en un determinado sector del lote, en cuyo caso esto se debería a un fallo en el sistema constructivo empleado. En caso de que esto suceda el lote debe considerarse como defectuoso inmediatamente. Se puede apreciar con más detalle en la siguiente figura.

NOTA: La designación de un límite de calidad de aceptación no significa que este nivel sea deseable, aun cuando lotes individuales con una calidad tan mala como el nivel de calidad de aceptación sea aceptada con

una probabilidad relativamente alta. Los esquemas de muestreo están diseñados de manera que motivan a los contratistas a tener procesos con promedios de calidad consistentemente mejores que el AQL. De no mantener un buen nivel de calidad, tendrían un alto riesgo que se rechace el lote.

3.1.10 Calidad de riesgo del consumidor CRC

Nivel de calidad del proceso o de un lote que corresponde a un riesgo especificado del consumidor, para el plan de muestreo.

NOTA El riesgo del consumidor es del 10 % en los planes aquí presentados.

3.1.11 Calidad límite CL

Un nivel de calidad que, para el propósito de una inspección por muestreo, tiene una baja probabilidad de aceptación cuando se considera un lote aisladamente.

3.1.12 Integridad estructural de un pilote

Se refiere a la uniformidad de su sección transversal a lo largo de toda su estructura longitudinal, es decir, que el pilote no tenga oquedades o cavernas; así como también al buen contacto con el terreno en la punta y en las paredes.

3.1.13 Prueba de integridad estructural de pilotes (PIT)

Es una prueba que se realiza en campo a cualquier tipo de pilotes, en donde se logra verificar la integridad estructural del elemento a través de transmisión de ondas en su estructura.

3.2 Símbolos y abreviaciones

Los símbolos y abreviaciones utilizados en esta propuesta de normativa son los siguientes:

Ac número de aceptación del lote.

CL calidad límite (en % pilotes defectuosos).

CRC calidad de riesgo del consumidor.

N tamaño de lote.

n tamaño de muestra.

AQL nivel de calidad de aceptación en % pilotes defectuosos máximo del lote.

Re número de rechazo del lote.

PIT prueba de integridad estructural de pilotes.

4. BASES DE APLICACIÓN DEL PLAN

Para los fines de aplicación del plan de muestreo aquí presentado se ha establecido como atributo principal a la integridad estructural del pilote por ser la única característica cuantificable que proporciona suficiente información sobre la aceptabilidad de un pilote y por consiguiente de un lote de pilotes.

5. EXTRACCIÓN DE MUESTRAS

5.1 Selección de una muestra

Los ítems para la muestra deben ser extraídos del lote por un muestreo aleatorio simple (véase 2.1.5 en la COVENIN-ISO 3534-2:1994).

5.2 Momento de tomar las muestras

Las muestras se pueden tomar y ensayar con PIT luego de haber transcurrido por lo menos 1 mes después del vaciado de cada pilote a ensayar. Ello por cuestiones del reacomodo de la estructura del suelo (Tixotropía), disipación de exceso de presiones de poros, restablecimiento de contacto entre suelo y pilote, entre otras.

6. PLAN DE MUESTREO

Los pasos a seguir para utilizar este plan de inspección propuesto son los siguientes:

1. Identificar el tamaño del lote de pilotes en campo (N).
2. Utilizar la tabla 2 presentada a continuación, ubicando el tamaño del lote ya identificado.
3. Para ese tamaño de lote verificar cual es el tamaño de la muestra a ser tomada aleatoriamente con la tabla 2
4. Ubicar la muestra del tamaño indicado en el campo, utilizando el método de muestreo aleatorio simple.
5. Definir el valor de AQL a ser utilizado dependiendo de la importancia de la estructura o proyecto, según tabla 1.

Tabla 1. Valores de AQL según la estructura en estudio.

Tipo de estructura	AQL
Edificación sensible a asentamientos. No se permite formación de grietas (Distorsión angular menor a 1/500).	0.040
Edificación en donde se permite la aparición de grietas (Distorsión angular hasta 1/300).	0.25
Edificación no sensible a asentamientos. Se permite la formación de grietas (Distorsión angular hasta 1/150).	0.65

Fuente: Salvatorelli, G y Quijada, I, “Propuesta para norma de aceptación y rechazo de pilotes”, (2018).

6. Ubicar los criterios de aceptación y rechazo para las características ya establecidas en la tabla 2.
7. Con la muestra ya ubicada, realizar la prueba de integridad estructural (PIT) a cada uno de los pilotes.
8. Verificación de cumplimiento de los criterios de aceptación y rechazo de acuerdo a los resultados obtenidos de las PIT. (Más adelante se explican el procedimiento).
9. Aceptación o rechazo del lote en función del punto anterior.

Con respecto al cumplimiento de los criterios de aceptación y rechazo comentado en el punto 8, pueden presentarse diferentes casos que deben ser estudiados, los cuales son:

- Número de pilotes defectuosos = Número Re del plan de inspección

Debido a que el lote no cumple con el criterio, se procede a repetir el procedimiento nuevamente, extrayendo la muestra ya ensayada de la población total de pilotes en el lote, para disminuir el espacio muestral y aumentar las probabilidades de hallar pilotes defectuosos a fin de verificar que no fue un evento fortuito.

Si nuevamente se encuentra que el criterio de aceptación no es cumplido, se rechaza el lote y se pasa a inspección 100% del mismo, procediendo a tomar las medidas necesarias para la solución de los problemas estructurales generados por los pilotes defectuosos que se encuentren.

En caso de cumplir el criterio de aceptación, el lote se acepta, pero se debe tomar las medidas necesarias para la solución del problema estructural generado por el o los pilotes defectuosos encontrados en la primera toma de muestras.

- Número de pilotes defectuosos > Número Re del plan de inspección

En este caso el lote es rechazado y se pasa a inspección 100% del mismo, procediendo a tomar las medidas necesarias para la solución de los problemas estructurales generados por los pilotes defectuosos que se encuentren. Esto debido a que existen problemas constructivos en la ejecución de los pilotes del lote.

- Número de pilotes defectuosos = Número Ac del plan de inspección

En este caso el lote es aceptado.

Nota: Si el lote es aceptado aun habiendo ubicado algún pilote defectuoso, se debe tomar las medidas necesarias para la solución del problema estructural generado por el o los pilotes defectuosos encontrados. Es decir, si el número Ac es 1 por ejemplo y se encuentra solo un pilote defectuoso en la toma de muestras, el lote es aceptado, pero se debe reparar ese pilote encontrado defectuoso.

Aclaratoria

Cuando se rechaza un lote, ello no quiere decir que todos los pilotes del lote se desechan. Simplemente se debe hacer una inspección minuciosa del 100% de los pilotes para así asegurar la calidad del lote, ya que en este caso existe un problema constructivo que ocasiono la falla.

Tabla 2. Plan de inspección por atributos para aceptación y rechazo de lotes de pilotes

Tabla maestra para criterios de aceptación y rechazo de pilotes en muestreo simple												
Tamaño de lote	Tamaño de muestra	Nivel de calidad aceptable (AQL) en porcentaje										
		0.010	0.015	0.025	0.040	0.065	0.10	0.15	0.25	0.40	0.65	1.0
		Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re	Ac Re
2 a 8	2	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
9 a 15	3	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
16 a 25	5	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
26 a 50	8	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
51 a 90	13	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
91 a 150	20	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
151 a 280	35	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
281 a 500	50	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
501 a 1200	80	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
1201 a 3200	125	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
3201 a 10000	200	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
10001 a 35000	315	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
35001 a 150000	500	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
1510001 a 500000	800	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
500001 y mas	1250	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

Fuente: Salvatorelli, G y Quijada, I, “Propuesta para norma de aceptación y rechazo de pilotes”, (2018)

Ac =Numero de pilotes no íntegros máximo para aceptar el lote.

Re=Numero de pilotes no íntegros a partir del cual se rechaza el lote.

↑ Utilizar los criterios de Ac y Re del primer plan por encima de la flecha, pero el tamaño de muestra se mantiene.

↓ Utilizar los criterios de Ac, Re y tamaño de muestra del primer plan por debajo de la flecha. Sí el tamaño de muestra es mayor al tamaño del lote, efectuar inspección 100%.

7. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DEL PLAN DE MUESTREO

A continuación se presentan distintos ejemplos de aplicación del plan de muestreo propuesto para mejor entendimiento:

- Ejemplo Caso 1:

Se tienen 150 pilotes pertenecientes a la fundación de una estructura en donde se permite la aparición de algunas grietas.

$N=150$ pilotes; $AQL=0.25$ (obtenido de tabla 1)

Entrando en tabla 2, tenemos que:

$n=50$ (Primer plan de muestreo bajo la flecha); $Ac=0$; $Re=1$.

Los resultados del PIT aplicado a los 50 pilotes arrojan que 1 pilote presenta problemas de integridad estructural, por lo que es un caso 1.

Nuevo tamaño de lote $N'=150-50=100$ pilotes.

Entrando en tabla 2 con los datos presentados vemos que la muestra nuevamente es de 50 pilotes.

Los resultados del PIT aplicado a los 50 pilotes arrojan que no hay pilotes defectuosos, por lo tanto se acepta el lote, pero se debe encontrar una solución estructural al pilote encontrado con defectos.

- Ejemplo Caso 2:

Se tienen 500 pilotes pertenecientes a la fundación de una estructura sensible a los asentamientos.

$N=500$ pilotes; $AQL=0.040$ (obtenido de tabla 1)

Entrando en tabla 2, tenemos que:

$n=315$ (Primer plan de muestreo bajo la flecha); $Ac=0$; $Re=1$.

Los resultados del PIT aplicado a los 315 pilotes arrojan que 3 pilotes presentan problemas de integridad estructural, por lo que es un caso 2.

El lote es rechazado, se debe pasar a inspección 100% y se deben resolver los casos de pilotes defectuosos encontrados.

- Ejemplo Caso 3:

Se tienen 100 pilotes pertenecientes a la fundación de una estructura en la que se permiten grietas (no tienen restricción).

$N=100$ pilotes; $AQL=0.65$ (obtenido de tabla 1)

Entrando en tabla 2, tenemos que:

$n=20$ (Primer plan de muestreo bajo la flecha); $Ac=0$; $Re=1$.

Los resultados del PIT aplicado a los 20 pilotes arrojan que 0 pilotes presentan problemas de integridad estructural, por lo que es un caso 3.

Siguiendo los criterios establecidos, se acepta el lote.

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que el presente documento sea discutido y evaluado en mutuo acuerdo entre todas las partes involucradas, inspección, contratista y contratante antes de iniciar la obra, para evitar los malentendidos en el transcurso de la misma si se va a aplicar el plan de inspección propuesto.
- Indistintamente de si se va a aplicar este u otro plan de inspección se recomienda siempre mantener una excelente calidad constructiva en donde se controlen todos los aspectos que afectan a la integridad estructural de un pilote.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Military standard 105E, “Sampling procedures and tables for inspection by attributes”, (1989).
- Covenin 3133-1 2001, “Procedimientos de muestreo para inspección por atributos”.
- Salvatorelli, G y Quijada, I, “Propuesta para norma de aceptación y rechazo de pilotes”, (2018).

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

6.1.1 Con respecto a la estimación de la probabilidad de daño estructural

- El record histórico de fracaso de las empresas de pilotaje no puede ser utilizado para la estimación de la probabilidad de obtener pilotes malos en un lote, ya que con los aspectos constructivos reales de cada obra en particular dicha probabilidad puede variar sensiblemente.
- El cumplimiento de las normas QA no es primordial para que un pilote quede integro estructuralmente, sino que más bien son los aspectos constructivos los que realmente repercuten en la integridad.
- Aun cuando se tenga el mayor de los cuidados en todos los factores que afectan la integridad durante la construcción, y se cumpla con QA inclusive, siempre existe una ligera probabilidad de que un pilote no quede integro estructuralmente.
- De todas las variables estudiadas, se puede afirmar que con algún descuido en la construcción de un pilote, que produzca una falla en cualquiera de los factores que afectan la integridad, la probabilidad de obtener un pilote integro se reduce sensiblemente.
- Las variables más influyentes en la afectación de la integridad estructural de un pilote son las que involucran problemas relacionados con el concreto, es decir, deficiencias en la mezcla o en la forma del vaciado. Tal como asentamiento, tamaño máximo del agregado vs separación del acero, forma de vaciado, o combinación entre ellas.

6.1.2 Con respecto a la estimación de la probabilidad de alcanzar la capacidad portante

- Los pilotes que no presenten problemas de integridad estructural tienen una muy alta probabilidad de alcanzar su capacidad portante en asentamientos admisibles para las estructuras.
- El comportamiento en asentamientos muy pequeños, entre 1-3mm (dependiendo del diámetro del pilote), de los ensayos estático y dinámico es muy similar, lo que permite la utilización del ensayo dinámico para la estimación de la capacidad portante haciendo uso de curvas obtenidas por medio de ensayos estáticos para asentamientos pequeños.
- Los pilotes en donde se haya calculado su capacidad términos de proyecto, con las ecuaciones presentadas en las bases teóricas de este TEG, soportada de un estudio de suelos realizado correctamente, y que además no presenten problemas de integridad, no deben presentar problemas a la hora de estimar la probabilidad de alcanzar su capacidad portante utilizando ensayos dinámicos.

6.1.3 Con respecto a la aceptación y rechazo de lotes de pilotes

- El rechazo de un lote es un tema muy complejo y con muchas consecuencias económicas, pero ello no significa que el lote este 100% defectuoso, implica que este debe ser inspeccionado minuciosamente por la incertidumbre generada, y los pilotes defectuosos hallados deben ser compensados por otros (añadiendo pilotes y reorganizando la disposición de los cabezales, dependiendo del caso), ya que es imposible retirarlos del sitio donde están construidos.
- Para AQL mayores al 1% no aplica un plan de inspección para pilotes, ya que es muy permisivo y permitiría que el contratista desmejore su calidad constructiva.
- Al fallar en la ejecución constructiva de pilotes, y sobre todo en las fases más críticas demostradas, la probabilidad de encontrar al menos un pilote malo durante la aplicación del plan de muestreo es radicalmente mayor a comparación de cuando se sigue correctamente el proceso constructivo.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar otros estudios para indagar más en la variabilidad de las distintas probabilidades de los factores que hacen que un pilote quede mal, para de esta manera poder ajustar de mejor forma el modelo.
- Se recomienda trabajar exhaustivamente en el chequeo de obra de la correcta realización de los trabajos relacionados a la construcción de un pilote para poder asegurar su integridad estructural. Para ello se recomienda seguir el “Manual para el ingeniero inspector” por Centeno-Rodríguez y asociados ubicado en los anexos parte 3.
- Se recomienda ampliar el abanico de variables que pueden afectar a la integridad estructural de un pilote.
- Se recomienda ampliar el abanico de variables que pueden afectar al desarrollo de la capacidad portante de un pilote.
- Se recomienda siempre utilizar los equipos adecuados de medición a la hora de estimar si un pilote alcanzara su capacidad portante en los asentamientos que se desean.
- Se recomienda que las normas QA sean orientadas para el caso de la construcción de pilotes, a los aspectos que realmente son representativos y afectan a su correcto desempeño. Estos aspectos son mayormente los relacionados a la ejecución en obra para la construcción de los pilotes, tal como es demostrado en este TEG.

Bibliografía

- O'Neill M., and Reese L.C., “*Drilled Shafts: Construction Procedure and Design Methods*”. Publication No. FHWA-IF-99-05, (1999).
- API RP 2 A – “*Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design*”, (2002).
- Kramer, S., “*Geotechnical earthquake engineering*”, Prentice-Hall, (1996).
- Das, Braja M., “*Principles of Foundation Engineering*”, 8th Edit, CENGAGE Learning, (2014).
- Lambe, T.W. and R.V Whitman, “*Soil Mechanics*”, Wiley, (1969).
- Baecher, Gregory B and Christhian, John T, “*Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*”, Wiley, (2003).
- Devore, Jay L, “*Probability and statistics for engineering and the sciences*”, Brooks/Cole, (1982).
- Pérez G. Gustavo y Carrillo P. Pedro, “*Ingeniería de Fundaciones*”, (1981).
- Apuntes del Ing. Heriberto Echezuría sobre “*Control de calidad y recomendaciones constructivas en la ejecución de cimentaciones profundas*”.
- Apuntes del Ing. Heriberto Echezuría sobre “*Pruebas estáticas y dinámicas en pilotes*”.
- Klingmuller, Oswald and Kirsch, Fabian, “*A quality and safety issue for cast in place piles with low strain integrity testing in Germany*”, (1998).
- Ing. Pedro José Salinas “*Metodología de la investigación científica*”, (2010)
- H. Tang, Wilson y Ang, Alfredo, “*Probability concepts in engineering planning and design*”, (1980).
- Bach, Duong, “*Reliability-based design and quality control of bored piles*” (2014).
- Military standard 105E, “*Sampling procedures and tables for inspection by attributes*”, (1989).
- Rodríguez, Luis, “*Probabilidad y estadística básica para ingenieros*”, (2007).
- Covenin 3133-1 2001, “*Procedimientos de muestreo para inspección por atributos*”.
- Álvarez, A y Alfonso, F, “*Estimación de las capacidades de fuste y punta en pilotes mediante ensayos dinámicos de baja energía*”, (2018).
- Baigés A, James (2015). “*Dynamic Pile Load Testing*”. Recuperado de: <http://prltap.org/eng/wp-content/uploads/2015/08/Dynamic-Pile-Load-Testing-august-2015.pdf>
- Ecured.cu. (2018). Muestreo para la aceptación o inspección por atributos. Recuperado de: https://www.ecured.cu/Muestreo_para_la_aceptaci%C3%B3n_o_inspecci%C3%B3n_por_atributos

- Ruiz A y Rojas F (2006). Madrid. “Muestreos de aceptación. Recuperado de: <http://web.cortland.edu/matresearch/Aceptacion.pdf>
- OPRE 6364 (2007). “Acceptance Sampling”. Recuperado de: http://web.tecnico.ulisboa.pt/mcasquilho/acad/cq/qfund/Q_AS_UTexD.pdf
- Ingecivilcusco (2012). “Pilotes”. Recuperado de: <http://ingecivilcusco.blogspot.com/2009/06/pilotes.html>
- Geotecniafacil (2015). “Tipos y ejecución pilotes excavados y hormigonados in situ”. Recuperado de: <http://geotecniafacil.com/tipos-y-ejecucion-pilotes-excavados-y-hormigonados-in-situ/>
- Hussein M., and Likins G (2007). “Deep Foundations Quality Control and Quality Assurance Testing Methods”. Recuperado de: https://www.grlengineers.com/wp-content/uploads/2005/03/FES_March05_pg10.pdf
- Parisca, Laurenis, “Variación de la viscosidad y la calidad del lodo utilizado para la construcción de pilotes, considerando la cantidad de solidos suspendidos”, (2015).
- Ing, Centeno, Roberto, “Inspección y Control de obras civiles”, (1981).

Anexos

Ver archivos:

1. Anexo 1: Árboles de decisión para estimación de la probabilidad de integridad estructural.
2. Anexo 2: Árboles de decisión para estimación de desarrollo de capacidad portante.
3. Anexo 3: Flujograma de ejecución de actividades de obra para construcción de pilotes.