

**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
Facultad de Construcciones.
Departamento de Ingeniería Civil.**



TESIS DE GRADO

**Aplicación de la Prueba de Integridad de Pilotes en puentes de Cayo
Cruz, Camagüey.**

**AUTOR: Yandiel Santos Melgarejo
TUTOR: Dr. Ing. Luis O. Ibañez Mora**

Santa Clara 2016

Índice.

Resumen. 3

Introducción..... i

Capítulo 1: Estado del Arte.....1

1.1 Introducción1

1.2 Descripción del proyecto en estudio.1

1.3 Cimentaciones sobre Pilotes3

1.3.1 Capacidad de carga de cimentaciones sobre pilotes4

1.3.1.1 Capacidad de carga de pilotes en roca. Resistencia por fuste como función lineal de la resistencia a compresión simple.7

1.4 Ensayos de Integridad en Pilotes. Métodos no destructivos.....13

1.4.1 Ensayo dinámico14

1.4.2 Ensayo de integridad por el método ultrasónico14

1.4.3 Ensayo de integridad por el método sísmico15

1.5 Ensayos de Integridad PIT. Reseña Histórica.....17

1.5.1 Equipo17

1.5.2 Normatividad del ensayo18

1.5.3 Ventajas y desventajas del PIT19

1.6 Características del ensayo.....19

1.6.1 Preparación del pilote para el ensayo22

1.6.2 Realización del ensayo en obra23

1.6.3 Influencia del terreno de cimentación23

1.6.4 Acciones Correctoras.....24

1.6.5 Informes de resultados.....25

1.7 Empleo de Modelación Matemática en la determinación de capacidad de carga sobre pilotes.25

1.8 Empleo de las PIT en obras reales.....26

1.9 Conclusiones parciales.30

Capítulo 2. Estudio Patológico Puente No 1 y No 3. Pedraplén Jigüey - Cayo Romano29

2.1 Generalidades.29

2.2 Objetivos.....29

2.3 Información Básica29

2.4 Volúmenes de los trabajos y metodología empleada.31

2.5 Resultados de la evaluación del hormigón de los pilotes.34

2.6 Resultados de la evaluación de la armadura de los pilotes.....	40
2.7 Resultados del Ensayo de Prueba de Integridad PIT en los pilotes de cimentación. Puente 1.....	42
2.8 Resultados del Ensayo de Prueba de Integridad PIT en los pilotes de cimentación. Puente 3.....	43
2.9 Análisis de la capacidad soportante de los pilotes. Puente 1	45
2.10 Conclusiones y recomendaciones parciales.	48
Capítulo 3: Determinación de la Capacidad de Carga.....	51
3.1 Introducción.....	51
3.2 Análisis de los informes ingeniero geológicos. Puente 1	51
3.3 Modelación por métodos numéricos.....	54
3.4 Análisis de los pilotes correspondientes a los puentes en estudio.	66
3.5 Modelación de capacidad de carga de pilotes en suelo	73
3.6 Resultados finales.....	76
3.5 Conclusiones parciales	78
Conclusiones.....	80
Recomendaciones.....	80
Bibliografía.....	82

Resumen.

El presente Trabajo de Diploma aborda el método de baja deformación mediante la prueba de integridad de pilotes, en inglés Pile Integrity Test (PIT) que es de los más utilizados hoy en día para la comprobación de la integridad de pilotes y la determinación de su longitud, debido a que los pilotes son inaccesibles prácticamente en su totalidad, no se puede comprobar que el mismo se ha ejecutado correctamente y que satisfaga las exigencias para las que ha sido diseñado.

Se define la tipología de pilotes que existen, el campo de aplicación, la normativa aplicable, haciendo hincapié en los pilotes de hormigón armado ejecutados "in situ", ya que dichos ensayos (PIT) son aplicables únicamente a pilotes de hormigón. Se explica con detalle el funcionamiento del método de ensayo, para después posteriormente entender mejor los resultados expresados. Se explica además los defectos más comunes que suelen ocurrir durante la construcción de cimentaciones sobre pilotes, para poder intuir, en función de los resultados de ensayo, que ha podido pasar. Los resultados de las pruebas de integridad de pilotes nos aportarán información suficiente para establecer la longitud no afectada de la cimentación.

El trabajo de diploma tiene la finalidad de obtener mediante métodos analíticos la capacidad de carga de cimentaciones sobre pilotes pertenecientes a los puentes del pedraplén Jigüey, Cayo Romano, Cayo Cruz. Con la ayuda de las pruebas de integridad de pilotes es posible realizar estos cálculos debido a que este método nos brinda como resultado la longitud de los pilotes.

Abstract

This Diploma work deals with the method of low deformation by integrity test piles in English Pile Integrity Test (PTT) which is the most widely used today for testing the integrity of piles and determination of its length because the piles are almost entirely inaccessible, it can not verify that the same procedure is successful and meets the requirements for which it was designed.

The type of piles that exist, the scope, applicable regulations, emphasizing the reinforced concrete piles executed "in situ" is defined as these tests (PTT) are applicable only to concrete piles. Explained in detail the operation of the test method, then later expressed better understand the results. the most common defects that often occur during the construction of pile foundations, to intuit, depending on the test results, which could go further explains. The test results integrity of piles provide us sufficient information to establish the length of the foundation unaffected.

The diploma work is intended to obtain by analytical methods load capacity of pile foundations belonging to Jigüey causeway bridges, Cayo Romano, Cayo Cruz. With the help of the pile integrity testing it is possible because these calculations this method gives us as a result the length of the piles.

Introducción.

Introducción.

La experiencia que se ha alcanzado en la construcción de proyectos ha obligado a realizar como etapa fundamental y básica el diseño de cimentaciones por la importancia que ellas tienen en la construcción de cualquier tipo de obra que se vaya a ejecutar. Las cimentaciones serán de acuerdo al conocimiento de factores como: la carga que será transmitida por la superestructura, el comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos que soportarán el sistema y las condiciones geológicas de suelo.

Para determinar el tipo de cimiento a escoger se realizará un estudio de suelos, y previo conocimiento sobre las cargas que se transmitirán al mismo, el ingeniero recomienda el tipo de cimentación más adecuado. Dentro de las múltiples opciones, las cimentaciones profundas son consideradas como una opción indiscutible cuando las capas superiores del terreno tienen poca capacidad de apoyo. En el diseño de las cimentaciones profundas el ingeniero considera que los elementos que actúan con el suelo tienen geometría homogénea, dimensiones de sección transversal y una longitud previamente diseñada. Consideradas todas las propiedades de las cimentaciones profundas se procede a su ejecución que puede llegar a afectar la forma de los pilotes bajo el suelo, provocando pérdida de capacidad portante, profundidad deseada, secciones transversales y calidad del material previsto en el diseño.



Figura 1. Pilote defectuoso

Por la dificultad de no saber con exactitud los problemas que puedan llegar a presentar los pilotes, posterior a su ejecución, ya que son elementos inaccesibles normalmente al constructor, en los últimos años se han desarrollado técnicas para detectar defectos en la construcción de pilotes y cimentaciones profundas en general, mediante ensayos de integridad estructural, que en Cuba, especialmente en Camagüey es la primera vez que se realiza la prueba de integridad de pilotes. Estos ensayos de integridad suministran información sobre las

dimensiones y el estado de elementos inmersos en el terreno una vez ejecutados, para confirmar su continuidad y para comprobar que se han ejecutado según lo previsto y que no ha surgido ningún problema durante su construcción.

Las incertidumbres generadas por los métodos de construcción de cimentaciones hacen de los métodos no destructivos para evaluar la calidad de los pilotes que sean herramientas indispensables para evaluar el estado final bajo la superficie del suelo.

Se utilizan principalmente para evaluar la integridad de cimentaciones profundas los siguientes métodos:

1. El registrador PIR (Pile Installation Recorder) para pilotes que van a ser fundidos in-situ (PIR-A)
2. La prueba CSL (Cross Hole Sonic Logger)
3. El método de alta deformación con el Pile Driver Analyzer (PDA)
4. El método de baja deformación mediante la prueba de integridad de pilotes PIT (Pile Integrity Test).

Este trabajo de diploma basa su investigación en el método de baja deformación mediante la prueba de integridad de pilotes PIT (Pile Integrity Test). Este ensayo de integridad de pilotes (PIT), determina el estado del pilote en cuanto a su continuidad, cambios de impedancia y verificación de su longitud final. Esta prueba es aplicable para pilotes relativamente largos y esbeltos.

El método se basa en la aplicación de un impacto de baja energía en la cabeza del pilote por medio del golpe de un martillo y en la verificación de la respuesta del sistema debido a dicha excitación. Para que se pueda realizar el ensayo PIT es necesario que el pilote tenga un área en su sección que permita la colocación del sensor, la aplicación de los golpes y la propagación de la onda de manera adecuada en un concreto de buena calidad, representativo del resto del pilote. La prueba debe ser realizada e interpretada por ingenieros capacitados y certificados como operarios del equipo.

Su objetivo principal es determinar la variación con la profundidad de las características del concreto en cuanto al área de la sección y densidad. Los golpes dados por el martillo generan una onda de tensión que recorre el pilote y esta sufre reflexiones al encontrar cualquier variación de las características del material. Como la onda viaja a una velocidad fija conocida y el tiempo transcurrido entre la aplicación del golpe y la llegada de la reflexión son conocidas, es

posble determinar la localización exacta de los defectos.

Este ensayo se ha hecho muy popular por su rápida y fácil ejecución, por su capacidad de detectar daños en la superficie del pilote, por su equipo liviano, portátil y sobre todo por su bajo costo de ejecución posibilitando probar una gran cantidad de pilotes. La prueba PIT es una herramienta muy útil. Muchas veces detecta fallas de grave riesgo para la estabilidad de la construcción que de otra manera pasarían inadvertidas.

Este trabajo de diploma estudia a las pruebas de integridad de pilotes como la mejor alternativa y herramienta indispensable para investigar los pilotes que sirven de cimentación a los dos puentes situados en Cayo Cruz, Camagüey que presentaron fallos estructurales y se necesita saber si estos pilotes están en buen estado mediante este ensayo no destructivo. También con las pruebas de integridad de pilotes se obtendrá la longitud de los pilotes y calcular la capacidad de carga por método analíticos y compararlos con los resultados obtenidos por la ENIA nacional. También se modelará una situación que se presenta en un estribo donde los pilotes apoyan en roca, pero debajo de su punta existe poco espesor se quiere conocer su comportamiento a esta situación, con el fin de poder usar estos pilotes como cimentación de los nuevos puentes a construir.

Planteamiento y definición del problema.

Cómo determinar la longitud y los defectos de los pilotes en los puentes existentes en Cayo Cruz, Camagüey que presentaron fallos estructurales, mediante las pruebas de integridad de pilotes y con estos datos obtener la capacidad de carga por métodos analíticos y modelación matemática.

Fundamentación.

Con los resultados que mostraron las pruebas de integridad de pilotes y determinando la capacidad de carga de los mismo, se podrán verificar si los pilotes analizados se encuentran en buen estado para ser utilizados en los nuevos puentes en Cayo Cruz.

Hipótesis.

Con la aplicación de las pruebas de integridad de pilotes se obtienen los defectos y la longitud de los pilotes, este último parámetro se utiliza para obtener capacidad de carga de cimentaciones sobre pilotes mediante los métodos analíticos y la modelación matemática.

Objetivo.

Determinar mediante las Pruebas de Integridad de Pilotes la longitud de los pilotes para el cálculo de la capacidad de carga con la ayuda de los Métodos Analíticos y se Modelará la capacidad de carga de cimentaciones sobre pilotes.

Objetivos específicos.

Para dar cumplimiento al objetivo general anterior se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

- Realizar el estudio bibliográfico de los ensayos de prueba de integridad de pilotes.
- Analizar el funcionamiento general del método de baja deformación mediante prueba de integridad de pilotes y la información que le suministra al usuario para verificar el buen estado y longitud de este tipo de cimentaciones profundas.
- Comparar los resultados de los métodos analíticos con la modelación matemática en cuanto a capacidad de carga.

Preguntas de Investigación.

1. ¿Qué aplicación pueden tener las pruebas de integridad de pilotes en la determinación de la capacidad de carga para cimentaciones profundas?

Tareas de investigación.

Para dar cabal cumplimiento a los objetivos antes planteados se realizarán las siguientes tareas de investigación:

- Búsqueda bibliográfica sobre las Pruebas de Integridad de Pilotes, pilotes como cimentación profunda, funcionamiento del equipo, normatividad del ensayo y su ejecución.
- Realizar un procesamiento estadístico de los resultados de las Pruebas de Integridad de Pilotes realizadas por primera vez en Camagüey.

Metodología de la Investigación.

Para realizar la actual investigación se define las siguientes etapas, las cuales se complementan entre sí.

Etapas I: Definición de la problemática.

- Definición del tema y problema de estudio.
- Recopilación bibliográfica.

- Formación de la base teórica general.
- Planteamiento de las hipótesis.
- Definición de los objetivos.
- Definición de tareas científicas.

Redacción de la introducción.

Etapas II: Revisión bibliográfica.

- Estudio, análisis y crítica de los últimos adelantos científicos relacionados con el tema.
- Redacción del Capítulo I

Se da cumplimiento al objetivo específico 1.

Etapas III: Realización de las Pruebas de Integridad de Pilotes.

- Obtención de los resultados de la Prueba de Integridad de Pilotes.
- Análisis e interpretación de los resultados de las Pruebas de Integridad de Pilotes.

Redacción del Capítulo II.

Se da cumplimiento al objetivo específico 2.

- *Etapas IV: Realizar un procesamiento estadístico de los resultados de las Pruebas de Integridad de Pilotes.*
- *Determinación de la capacidad de carga de los pilotes por diferentes metodologías*
- Redacción del capítulo III.

Elaboración de conclusiones y recomendaciones

Novedad Científica

Se toman los resultados de una Prueba de Integridad de Pilotes realizada por primera vez en Cuba para determinar capacidad de carga.

Aportes.

Después de finalizado el trabajo se comprobará si la capacidad de carga calculada de los estribos resiste la carga que será transmitida por el puente 1, con la ayuda de las Pruebas de Integridad de Pilotes.

Estructura de la Tesis.

La estructura de la tesis está relacionada directamente con la metodología de la investigación establecida y de un modo específico en el desarrollo particular de cada una de las etapas de la

investigación. La misma se encuentra formada por una introducción general, cuatro capítulos, las conclusiones, recomendaciones y bibliografía, así como los anexos necesarios.

El orden y estructura lógica del trabajo se establece a continuación:

- **Síntesis**
- **Introducción**
- **Capítulo I:** Estado del Arte
- **Capítulo II:** Estudio Patológico Puente No 1 y No 3. Pedraplén Jigüey - Cayo Romano
- **Capítulo III:** Determinación de la capacidad de carga
- **Recomendaciones**
- **Bibliografía.**
- **Anexos.**

Capítulo 1.

Capítulo 1: Estado del Arte.

1.1 Introducción

Los pilotes como una forma de cimentación profunda son utilizados cuando las primeras capas del suelo presentan poca capacidad de apoyo. Mediante la ejecución de los pilotes fundidos in situ pueden llegar a existir anomalías en cuanto a su integridad estructural, al desconocerse su estado actual se llevan a cabo las pruebas de integridad de pilotes que nos brindan resultados, para calcular su capacidad de carga y con la ayuda de las expresiones que se mostraran a continuación, poder utilizar estos pilotes como soporte en posteriores proyectos. Para conocer el estado y características de este tipo de cimentación se procede a la utilización de los métodos no destructivos, específicamente las Pruebas de Integridad de Pilotes (PIT) que se dará una breve reseña histórica de como se ha utilizado este método, las características fundamentales del equipo y la normatividad del ensayo. Este capítulo también estudia las características del ensayo y muestra cómo se pueden calcular los resultados como la velocidad a la que viaja la onda por la longitud del pilote, la impedancia y como obtener la longitud del pilote o donde se encuentran los defectos del mismo con la velocidad de onda antes calculada y el tiempo. Se expone como debe estar preparado el pilote, influencia del terreno, secuencia de ejecución, acciones correctoras, criterios de aceptación o rechazo de los ensayos de integridad de pilotes y las invariantes del diseño. Se muestran ejemplos reales de resultados, las ventajas y desventajas de las PIT. También como se hace empleo de Modelación Matemática en la determinación de capacidad de carga sobre pilotes y se realizaron correlaciones teóricas entre las pruebas de carga y la modelación matemática con las PIT.

1.2 Descripción del proyecto en estudio.

El siguiente trabajo de diploma se centra en llevar a cabo investigaciones pertinentes a las cimentaciones existentes en los Puentes 1 y 3 pertenecientes a la vía de categoría I de carácter nacional denominada Pedraplén Jigüey-Cayo Romano-Cayo Cruz, la cual está sometida a un proceso de reconstrucción. En esta se contempla la reparación y ampliación de los mismos, a los cuales se le adicionarán una o dos luces de 20.00 m, con el objetivo de disminuir el nivel de salinidad actual de la bahía.

El Puente Nb.1 se encuentra situado actualmente entre las Est=295+1.10 y la Est.=297+1.10 del trazado en reconstrucción, fue diseñado y construido con una solución de Luces= $1 \times 20 \text{m} = 20 \text{ m}$. Su cimentación de tipo indirecta y está formada por pilotes. Se mantendrá con

esta longitud. La cimentación que lo integra es de 16 pilotes que pretenden ser aprovechados para el nuevo puente por un período de 50 años más, pero se desconoce su longitud. Este puente no será ampliado

El Puente No.3 se ubica actualmente entre las Est.=468+6.60 y la Est.=472+6.60 de la traza del Pedraplén en reconstrucción, fue diseñado y construido con una solución de Luces= 2x20m=40 m. Su cimentación al igual que el No. 1 es de tipo indirecta y la transferencia de cargas la realiza mediante pilotes. A este se le añadirán 2 luces de 20.00 m en dirección a Romano, el aumento en longitud de estas obras conlleva a que las estructuras que sirven de apoyo al tablero del puente en el extremo a ampliar cambien de función, los estribos, se convierten en pilas duplicándose prácticamente la carga actuante en los mismos. La cimentación que lo integra es de 24 pilotes que pretenden ser aprovechados para el nuevo puente por un período de 50 años más, pero se desconoce su longitud.

En las dos obras a estudiar se realizará una reparación prácticamente capital, pero si se utilizaran las cimentaciones existentes se minimizarían los gastos, pero teniendo en cuenta que no existe la información en qué estado se encuentran actualmente es imprescindible que se realice una investigación y estudio que conlleven a un diagnóstico confiable y profundo de estas cimentaciones. Al desconocer el estado de los pilotes se solicita la capacidad máxima de carga de cada uno de los pilotes que componen los apoyos de la superestructura existente en correspondencia con las mismas, realizando un análisis patológico de los mismos, teniendo en cuenta determinar la calidad real de ellos, resultado de ensayos realizados ya sean por métodos destructivos o NO, su adaptabilidad a las normas vigentes para este tipo de medio (altamente agresivo). En dependencia de su empotramiento en el estrato resistente a la profundidad adecuada, sólo entonces se definirá la utilización de esta cimentación en su totalidad, el rechazo de alguno o la ejecución de otros que complementen la capacidad de carga necesaria o se podría realizar el análisis de aligerar al máximo la superestructura a proyectar para llegar a la mejor y más económica solución.

Los pilotes existentes fueron ejecutados perforados fundidos in situ, teniendo un diámetro de 0.55 m y una camisa metálica no recuperada con la cual llega a un diámetro aproximado de 0.60 m. La parte inversionista realizó una investigación visual de estos elementos en la porción que se encuentra bajo el agua con una empresa especializada, el cual podría aportar algún criterio para completar la investigación.

1.3 Cimentaciones sobre Pilotes

El uso de pilotes es una de las técnicas más antiguas del hombre para superar las dificultades de la cimentación de estructuras en suelos blandos. El diseño de estas cimentaciones estaba basado en la experiencia o simplemente dejado a la divina providencia. En sus inicios, los pilotes eran todos de madera por su abundancia y su fácil maniobrabilidad, así que para dar seguridad a una estructura se hincaban pilotes en forma abundante, sin ninguna norma y a criterio del constructor. De esta manera, la capacidad de carga del pilote estaba limitada por el grosor de la madera y su capacidad de soportar el peso del martillo sin astillarse. Es así que en un principio se crearon reglas primitivas mediante las cuales la carga admisible de un pilote se basaba en la resistencia al golpe de un martillo de peso y altura de caída conocidos.

A medida que el desarrollo industrial aumenta, se crea una demanda de estructuras pesadas en lugares de terreno blando; surge entonces el pilote de concreto como una solución que supera largamente al pilote de madera, debido a que podía ser fabricado en unidades de las mismas dimensiones que el pilote hecho de madera, pero capaz de soportar compresiones y tensiones mucho mayores. Además, que puede moldearse en cualquier forma estructural de acuerdo a las solicitaciones de carga y del tipo de suelo sobre el que se hinca. Con el desarrollo de las máquinas de gran eficiencia de perforación a gran profundidad y diámetro, se reemplazó parcialmente los pilotes hincados por los pilotes moldeados in-situ. (Palacios, 2004)

Tabla 1.1 Clasificación de cimentaciones sobre pilotes

Clasificación de las cimentaciones sobre pilotes:

Según su instalación	Pilotes aislados Grupo de pilotes
Según el tipo de carga que actúa sobre el pilote	A compresión A tracción A flexión A flexo-compresión
Según el tipo de material del pilote	De madera De concreto De concreto armado De acero o metálico Pilotes combinados o mixtos
Según la interacción sueb-pilote	Pilotes resistentes en punta Pilotes resistentes en fuste o a fricción

Pilotes resistentes en punta y fustes simultáneamente	
Por la forma de la sección transversal	Cuadrados Circulares Doble T Prismáticos T Otros
Por la forma en que se construyen	Pilotes prefabricados hincados con ayuda de martillos sin extracción previa de suelo Pilotes hincados por vibración con o sin perforación del suelo Pilotes de concreto armado con camisa, hincados con relleno parcial o total Pilotes fundidos in situ de concreto o concreto armado

Pilotes Hormigonados In Situ

Los Pilotes Hormigonados In Situ son un tipo de Pilotes ejecutados en obra, tal como su nombre lo indica. Las armaduras se conforman como si fuesen jaulas; las armaduras longitudinales están constituidas por barras colocadas uniformemente en el perímetro de la sección, y el armado transversal lo constituyen cercos redondos de 6 mm de sección, con una separación de 20 cm. La cantidad de barras y el diámetro de las mismas, se calcula en función de la carga que deba soportar el pilote.

En referencia al hormigón utilizado, obliga a utilizar hormigones superiores a 25 MPa y con una consistencia medida en cono de Abrams de 10 a 15 cm. Los pilotes se descabezan, por ello, siempre se elimina el hormigón de baja calidad que queda en la parte superior. Cada pilote se hormigona de una vez sin interrumpir la operación, no se admiten juntas de hormigonado. Posterior al descabezado los pilotes deben sobresalir del terreno lo suficiente para permitir el empotramiento del hormigón de 5 cm mínimo para el encepado. (García, 2010)

1.3.1 Capacidad de carga de cimentaciones sobre pilotes

En el caso de pilotes de concreto los defectos son provocados fundamentalmente a la hora de su ejecución y pueden perder la forma de las características geométricas con las que fueron concebidos en su diseño, por lo que es necesario conocer el estado en que se encuentran y otros parámetros de interés. Para determinar la capacidad de carga en pilotes se han desarrollado fórmulas y criterios que pueden agruparse en cuatro clases que se citan a continuación:

- Pruebas de cargas.
- Métodos dinámicos.
- Ensayos de penetración.
- Métodos estáticos basados en la teoría de plasticidad

Prueba de carga.

El método más seguro para determinar la capacidad de carga de un pilote, para la mayoría de los lugares, es la prueba de carga Juárez (1975), Sowers (1977), Paulos and Davis (1980), Bras (1999) Jiménez (1986), Lambert (1991), Sales (2000), Fellenius (2001), Ibañez (2001), Vega Vélez (2005), Lourenco (2005). Dentro de ella se han desarrollado la prueba de asiento controlado (controlando el incremento de asiento o a una velocidad de asiento constante) y la prueba con carga controlada (incremento de carga constante en el tiempo o asiento mínimo para un incremento de carga). Este último es el más usado, ya que permite determinar la carga última cuando se ha movilizado la resistencia del suelo que se encuentra bajo la punta y rodeando al pilote.

A manera de resumen se muestran algunos criterios utilizados para determinar la capacidad de carga de un pilote a partir de los ensayos de carga.

Tabla 1.2 Criterios utilizados para determinar la capacidad de carga de un pilote a partir de los ensayos de carga.

Criterio	Descripción
1. Limitación de asentamiento total relativo	a) Desplazamiento en la punta mayor (D/30) (Norma Brasileña, ABNT, 1980)
2. Tangente a la curva carga – asentamiento (comportamiento hiperbólico)	a) Intersección de la tangente inicial y final de la curva carga – asentamiento definida por la carga admisible b) Valor constante de carga para asentamiento creciente
3. Limitación del asentamiento total	a) Absoluto 1 pulgada b) Relativo – 10% del diámetro
4. Postulado de Van de Beer (1953)	Asíntota de la función exponencial: $P=P_{\text{máx}}(1-e^{-az})$
5. Davisson (1980)	Desplazamiento aproximado de la punta del pilote mayor que $D/120 + 4\text{mm}$

Métodos dinámicos.

Estos métodos generalmente se asocian a la hinca de pilotes. Producto que la hinca de pilotes produce fallas sucesivas de la capacidad de carga del pilote, entonces se podría establecer teóricamente la relación entre la capacidad de carga del pilote y la resistencia que ofrecen a la hinca con un martillo.

Este análisis dinámico de la capacidad de carga del pilote que da lugar a fórmulas de hinca y ecuaciones de onda se ha usado por mucho tiempo. En algunos casos estas fórmulas han permitido predecir con exactitud la capacidad de carga del pilote Jiménez (1994), pero en otros casos su uso indiscriminado ha traído como consecuencia, unas veces la seguridad excesiva y otras el fracaso.

Como conclusión, podemos plantear que siempre que se cuente con la adecuada instrumentación electrónica [Aoki (1997), Balech (2000)] y una correcta modelación matemática, se puede estimar la capacidad de carga de las cimentaciones sobre pilotes por métodos dinámicos. (Palacios, 2004)

Ensayos de penetración.

Los ensayos de penetración son utilizados frecuentemente para determinar la capacidad soportante de los pilotes. El estado tensional y deformacional en el suelo debido a un pilote cargado con su carga última y el de un penetrómetro que se introduce en el suelo son muy similares. Por esta razón se puede establecer una relación muy estrecha entre la resistencia a penetración y la capacidad soportante del pilote Menzanbach (1968a). En Cuba se utilizan los modelos de penetración del cono holandés y los modelos soviéticos S-979 y Sp-59. Un análisis de las expresiones utilizadas para la determinación de la capacidad resistente por estabilidad del pilote aislado, evidencia que, estas no son más que la suma del aporte a fricción y en punta, afectados por un factor de escala entre la resistencia en punta del cono de penetración y la punta del pilote (β_1) y un factor de escala entre la fricción sobre la camisa del penetrómetro y el fuste del pilote (β_2). Un interesante enfoque del problema se desarrolló por Bustamente y Gianeselli (1982), basado en la interpretación de 197 ensayos de carga en Francia, en suelos limosos, arcillosos y arenosos. Otros textos consultados: Dajas (2001), Cunha (2004).

Métodos estáticos basados en la teoría de la plasticidad.

Son fórmulas que están basadas en principios teóricos y ensayos, que procuran determinar la capacidad máxima de carga que es capaz de resistir un pilote o grupo de estos en el medio (suelo). Sowers (1977), Juárez (1975), Jiménez (1986) y (1994), la Norma Soviética, L' Herminier (1968), Norma cubana (1989), Ibañez (2001), Paubs and Davis (1980), etc. entre otros coinciden en que la capacidad de carga se obtiene de la suma de la resistencia por la punta y por la fricción lateral en el instante de carga máxima:

$$Q_{total} = Q_{punta} + Q_{fricción} \quad \text{Exp.1.1}$$

Para el aporte en punta puede aceptarse:

$$Q_{punta} = A_b \cdot q_p \quad \text{Exp. 1.2}$$

A_b : el área de la punta y q_p la resistencia unitaria de punta.

Respecto a la fórmula inicial lo que se refiere a $Q_{fricción}$ puede aceptarse la expresión clásica:

$$Q_{fricción} = \pi \cdot D \cdot \sum L_i \cdot f_{si} \quad \text{Exp. 1.3}$$

D : es el diámetro del pilote, L_i es la longitud de cada estrato atravesado por el pilote y f_{si} la resistencia lateral en cada capa o estrato de suelo. (Palacios, 2004)

1.3.1.1 Capacidad de carga de pilotes en roca. Resistencia por fuste como función lineal de la resistencia a compresión simple.

En el siguiente trabajo de diploma se llevará a cabo el estudio de los pilotes apoyados en roca debido a que la situación que se presenta en la cimentación de los puentes que se dirigen a Cayo Cruz está apoyada en roca (Martínez, 2010). Por lo que se presentan varias expresiones para determinar el cálculo de la capacidad de carga de pilotes en roca.

Torne (1977) propone los siguientes valores mínimo y máximo para el cálculo de la resistencia por fuste:

$$\tau_{ult} = 0.05(\gamma > 0.1) \cdot \sigma_c \quad \text{Exp. 1.4}$$

Poubs y Davis (1980) establecen una resistencia admisible por fuste de $0.05 \sigma_c$. Suponiendo un coeficiente de seguridad de 3, se obtiene una resistencia última de $0.15 \sigma_c$, proporcionándose además una resistencia última de 0.45 MPa para el caso de rocas que no estén meteorizadas:

$$\tau_{ult} = 0.15 \cdot \sigma_c \quad (\tau_{ult} \leq 0.45 \text{MPa}) \quad \text{Exp. 1.5}$$

Tanto en esta teoría como en las formuladas a continuación, se considera un coeficiente de seguridad de 3. Aunque se trata de un valor elevado respecto del coeficiente de seguridad de 2.5 usado tradicionalmente para la evaluación de la resistencia por fuste, en el análisis comparativo la resistencia última por fuste se ha obtenido siempre multiplicando el valor de la carga admisible por 3.

La formulación ofrecida por Hooley y Lefroy (1993) solamente es aplicable para rocas fuertemente meteorizadas, con una resistencia a compresión simple muy baja, inferior a 0.25 MPa:

$$\tau_{ult} = 0.3 \cdot \sigma_c \quad (\sigma_c < 0.25 \text{ MPa}) \quad \text{Exp. 1.6}$$

Tabla 1.3. Resistencia por fuste de pilotes en roca.

Resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca como función lineal de la resistencia a compresión simple: $f(\sigma_c)$ $\tau_{ult} = \alpha \cdot \sigma_c$				
Autores	Fecha	Coeficiente α	Limitaciones	Observaciones
Thorne	1977	0,05 → 0.1	-	Propone un valor mínimo y otro máximo para τ_{ult}
Poulos & Davis	1980	0,15	$\tau_{ult} < 0,45 \text{ MPa}$	Para rocas no muy meteorizadas, se consideran $\tau_{ult} = 0,45 \text{ MPa}$
Hooley & Lefroy	1993	0,3	$\sigma_c < 0,25 \text{ MPa}$	Solamente aplicable a rocas fuertemente meteorizadas

Resistencia por fuste como función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión simple

La resistencia aportada por el fuste de un pilote a lo largo de su empotramiento en roca puede ser también obtenida como función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión simple:

$$\tau_{ult} = \alpha \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (\tau_{ult} \text{ y } \sigma_c \text{ en MPa}) \quad \text{Exp. 1.7}$$

Tabla 1.4. Resistencia por fuste de pilotes en roca

Resistencia por fuste de pilotes empotrados en roca como función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión simple: $f(\sigma_c^{1/2})$				
$T_{ult} = \alpha \cdot \sigma_c$				
Autores	Fecha	Coeficiente α	Limitaciones	Observaciones
Rosenberg & Journaux	1976	0,375	En pilotes de diámetro entre 210 - 610 mm, empotrados en pizarras.	-
Horvath et al.	1983	0,2 / 0,3	En pilotes de 710 mm de diámetro (aprox). en argilitas o similares.	Si la pared del pilote presenta cierta rugosidad, se considera un coeficiente de 0,3
Rowe & Armitage	1987	0,45 / 0,6	-	Si la superficie de contacto pilote - terreno es muy rugosa, se considera un coeficiente de 0,6
Wyllie	1991	0,4 → 0,6	-	Establece un límite inferior y otro superior.
Fleming et al.	1992	0,4	$\sigma_c < 0,50 \text{ MPa}$	Aplicable solo a rocas suficientemente blandas
Hooley & Lefroy	1993	0,15 → 0,4	$0,25 < \sigma_c < 3,00 \text{ MPa}$ en pizarras, lutitas y argilitas.	Aplicable sobre rocas alteradas y blandas
Kuhaw y & Phoon	1993	0,22 → 0,67	-	El coeficiente superior, para superficies de contacto pilote - terreno muy rugoso. El inferior, para rocas blandas.
Carubba	1997	0,13 → 0,25	-	Establece un límite inferior y otro superior.
Zhang & Einstein	1998	0,4 → 0,8	-	Establece un límite inferior y otro superior.

Propuesta de Norma Cubana

La Norma Cubana establece para la resistencia en punta de los tipos de pilotes: hincados, encamisados, rellenables y perforadores, los cuales se apoyan en suelos rocosos o poco compresibles ($E_o > 100000$ kPa) la fórmula:

$$Q^*_V = R^* \cdot A_p \text{ (kN)} \quad \text{Exp. 1.8}$$

donde:

A_p : área de apoyo del pilote (m^2) que se asume para los casos de pilotes de sección transversal constante e igual al área neta de la sección transversal para pilotes encamisados, huecos, cuando estos no son rellenados con hormigón. Si hay relleno con hormigón será igual al área bruta de la sección transversal, siempre que dicho relleno alcance una altura mayor o igual a $3D$ (b).

R^* : resistencia a compresión no confinada de los núcleos de roca (kPa), que se asume de la forma siguiente:

(*) Para pilotes encamisados, perforados o de huecos rellenados de hormigón apoyados en suelos rocosos se determina por la expresión siguiente:

$$R^* = \frac{K_{sq} \cdot \bar{R}}{\gamma_{gR}} \cdot dR \text{ (kPa)} \quad \text{Exp. 1.9}$$

donde:

\bar{R} : valor promedio de la resistencia límite a compresión axial del suelo rocoso en condiciones de humedad natural (en relación con el diámetro: altura de la muestra igual a dos, 2).

γ_{gR} : coeficiente de seguridad para los suelos igual a $\gamma_{gR}=1.6$.

$$dR = \left(1 + 0.4 \frac{LE}{D} \right) \leq 3.5 \quad \text{Exp. 1.10}$$

LE : profundidad de embebimiento del pilote obturado en la roca. Se asume igual a la profundidad de empotramiento (m).

D : diámetro exterior de empotramiento en el suelo rocoso.

Tabla 1.5. Valores de Ksq.

Valores de RQD	Espaciamiento de las discontinuidades (m)	Ksq
25 < RQD ≤ 50	0.06-0.2	0.1
50 < RQD ≤ 75	0.2-1.6	0.3
75 < RQD ≤ 90	1.6-2.0	0.75
90 < RQD ≤ 100	>2.0	1.0

RQD: índice de calidad de la roca, se define como el porcentaje de recuperación de pedazos de núcleos de rocas mayores de 10cm de longitud con respecto a la longitud del sondeo.

RQD= Longitud de los pedazos de núcleo de 10cm / longitud del sondeo.

La Norma Cubana establece para la resistencia a fricción en suelos cohesivos de los tipos de pilotes:

$$Q_f^* = \frac{P_p \sum_{i=1}^{i=n} f_i^* L_i}{\gamma_{gf}} \quad \text{Exp. 1.11}$$

$$f_i^* = \alpha C_u^* \quad \text{Exp. 1.12}$$

Valores de α

Caso 1: $100 \text{ kPa} \leq \overline{C_u} \leq 400 \text{ kPa}$

$$\alpha = \frac{(700 - \overline{C_u})}{1500} \quad \text{Exp. 1.13}$$

Caso 2: $30 \text{ kPa} \leq \overline{C_u} \leq 100 \text{ kPa}$

$$\alpha = \frac{(1250 - 8.5\overline{C_u})}{1000} \quad \text{Exp. 1.14}$$

Valores de C_u^* (kPa)

Los valores de cálculo de la cohesión no drenada C_u^* se determina para una probabilidad del 95 %, según:

$$c_u^* = \frac{\bar{c}_u}{\gamma_{gc}} \quad \text{Exp. 1.15}$$

El valor máximo del coeficiente de estimación de la cohesión γ_{gc} será de 1.4, tomándose este valor en el caso de que no se realice tratamiento estadístico. Si hay análisis estadístico se determina según:

Coeficiente de variación v_c	γ_{gc}
$V_c \leq 0.26$	1.2
$V_c > 0.26$	1.4

La Norma Cubana establece para la resistencia en punta en suelos cohesivos de los tipos de pilotes:

$$Q_p^* = \frac{A_p \cdot q_p^*}{\gamma_{gp}} \quad \text{Exp. 1.16}$$

$$q_p^* = d_{sc} \cdot N_c \cdot c_u^* \quad \text{Exp. 1.17}$$

Valores de N_c y de d_{sc} para $1.0 \leq \frac{L_E}{D} < 2.5$

Diámetro del Pilote (m)	N_c	d_{sc}
$D \leq 0.5$	5.14	$1.2 + 0.4 \tan^{-1} \frac{L_E}{D}$
$0.5 < D \leq 1.0$	5.14	$1.1 + 0.2 \tan^{-1} \frac{L_E}{D}$
$D > 1.0$	5.14	$1.0 + 0.1 \tan^{-1} \frac{L_E}{D}$

Valores de N_c y de d_{sc} para $\frac{L_E}{D} \geq 2.5$

Diámetro del Pilote (m)	$N_c \cdot d_{sc}$
$D \leq 0.5$	9
$0.5 < D \leq 1.0$	7
$D > 1.0$	6

En el caso de pilotes sometidos simultáneamente a fuerzas verticales de compresión y horizontales, siendo esta última superior al 10 % de la vertical, q_p^* se calcula mediante la siguiente expresión:

$$q_p^* = 5.14 C_u^* \quad \text{Exp. 1.18}$$

Tabla 1.6. Resistencia ultima por punta de pilotes empotrados en roca

Método utilizado para la determinación de la carga vertical resistente por estabilidad del pilote (rocas y suelos)			Resistencia en:	
			Punta γ_{gP}	Fuste γ_{gf}
Fórmulas estáticas. Teoría de la plasticidad en rocas			1.20	1.20
Fórmulas de la teoría de la plasticidad en suelos	Tipo de pilote	Tipo de suelo	γ_{gP}	γ_{gf}
		Hincado	Friccional	1.2
		Cohesivo	1.1	1.2
	Fundido in-situ	Friccional	1.4	1.3
Cohesivo		1.3	1.2	

1.4 Ensayos de Integridad en Pilotes. Métodos no destructivos.

Son tres los métodos utilizados con más frecuencia para comprobar la integridad estructural de pilotes mediante sistemas no destructivos:

- a) El método sónico mediante martillo de mano.
- b) El método de cross-hole ultrasónico.

c) El método es el ensayo dinámico.

Los ensayos de Integridad de Pilotes son métodos que le posibilitan al constructor conocer cómo se presentan sus características bajo el suelo luego de su ejecución y comprobar si puede ser utilizado para una posterior construcción sobre este tipo de cimiento sin dañar el pilote. (García 2010)

1.4.1 Ensayo dinámico

El método es el que dispone de más tradición, consistiendo en dejar caer una masa importante sobre la cabeza del pilote protegida por una sufridera, instrumentándose la cabeza del pilote para obtener la fuerza y la velocidad en función del tiempo. Es un método utilizado preferentemente en pilotes hincados, ya que aprovecha la misma energía proporcionada por el martillo de hinca. Es un método dinámico que induce una fuerte deformación en el pilote, denominándose generalmente "ensayo de respuesta dinámica" o simplemente "ensayo dinámico", aunque algunos autores no lo incluyen entre los ensayos de integridad. En pilotes hincados no requiere preparación especial ya que se utiliza el mismo martillo de hinca y la instrumentación es sencilla, pero en otros tipos de pilotes sí que requiere medios pesados, ajenos a los de ejecución del pilote, para disponer sobre el mismo una masa considerable con una cierta altura de caída. En la actualidad se han desarrollado sistemas más sencillos y transportables de dar la energía necesaria para el ensayo. (García 2010)



Figura 1.1. Ensayo dinámico

1.4.2 Ensayo de integridad por el método ultrasónico

El método ultrasónico consiste en hacer descender por dos tubos huecos paralelos en el interior del fuste del pilote o pantalla, un emisor y un receptor que envían y reciben señales, registrando el tiempo que tardan estas señales en recorrer la distancia entre ellos. Es también

un método dinámico que induce una baja deformación en el pilote, denominándose generalmente “Cross-Hole ultrasónico”, aunque también se le denomina “sondeo sísmico”, “sondeo sísmico”, “ensayo sísmico paralelo”, “cross-hole sonic logging” o “ensayo por transparencia sísmica”. Este ensayo se debe prever con anterioridad a la ejecución del elemento, ya que requiere que se dejen dos o más tubos embebidos en el hormigón o de lo contrario no se pueden ensayar por este método.



Figura 1.2 Equipo de registro de datos para el método ultrasónico Cross-Hole.

El método, se basa principalmente en el tiempo que tarda una onda ultrasónica en recorrer la distancia entre emisor y receptor a través del hormigón. Dichos emisor y receptor, se desplazan simultáneamente por dos tubos paralelos sujetos a la armadura del pilote, realizando un barrido desde la parte inferior del pilote o pantalla, hasta el borde superior de los tubos.

El tiempo medido es función de la distancia entre emisor y receptor y de las características del medio atravesado. También se registra la calidad de la señal que se recibe. La profundidad se mide mediante una rueda conectada al ordenador, a través de la cual pasa el cable de las sondas, y va girando a medida que las izamos. (Caballeros, 2003)

La unidad de control registra cada una de las señales que llegan a la sonda receptora y las almacena para su posterior tratamiento y presentación. De esta forma se obtiene un registro casi continuo a lo largo del fuste del pilote que permite determinar a cualquier profundidad si el hormigón es homogéneo o tiene heterogeneidades. (García 2010)

1.4.3 Ensayo de integridad por el método sísmico

Es el método más usado internacionalmente y consiste en golpear la cabeza del pilote con un martillo de mano y obtener mediante un acelerómetro el movimiento de la cabeza del pilote como consecuencia de la onda de tensión generada. Este método se denomina generalmente

“método sónico”, aunque también puede llamarse “sísmico”, “ensayo de integridad de baja deformación” o “sonic echo” (eco sónico). Se aplica generalmente a cualquier tipo de pilote y no requiere ninguna preparación para la realización del ensayo. Se aplica a cualquier tipo de pilote, no requiere ninguna especificación técnica para ensayos de integridad de pilotes preparación especial en el mismo, ni necesita equipo pesado, por lo que resulta económico y de gran rendimiento. Para pantallas, zapilotes, o en general elementos que no su geometría no sea cilíndrica o prismática, no se asegura el correcto funcionamiento del ensayo para su posterior interpretación, debido a que no sabemos ciertamente si la onda de compresión que generamos, desciende verticalmente, o se producen rebotes de onda que nos darían interpretaciones equívocas de la realidad.



Figura 1.3 Equipo para el ensayo mediante el método sónico. Martillo, acelerómetro y ordenador.

Estos ensayos de integridad de pilotes constituyen una potente herramienta de trabajo para poder determinar experimentalmente la existencia de defectos en los pilotes. El método sónico con martillo de mano está siendo empleado en el control de pilotes, sin que sea preciso ninguna preparación especial del pilote ni interferir con la marcha de la obra, dada la sencillez y rapidez del ensayo y su economía. El método ultrasónico "cross-hole" está siendo empleado en el control de pilotes de gran diámetro, siendo la única preparación previa necesaria el dejar tubos embebidos en el hormigón del pilote. Los modernos ensayos rápidos de carga permiten abaratar un método de diseño y comprobación de las cimentaciones mediante pilotes, que hasta ahora estaba reservado para obras de elevado presupuesto. Tanto los ensayos de integridad estructural como los ensayos rápidos de carga disminuyen el margen de incertidumbre existente en la construcción de cimentaciones profundas. (García 2010)

1.5 Ensayos de Integridad PIT. Reseña Histórica.

El desarrollo de la prueba dinámica de baja deformación para la determinación de las condiciones de integridad de pilotes, es el resultado de todo un proceso histórico iniciado desde el comienzo mismo en que fueron utilizados estos elementos.

La prueba de integridad de baja deformación tuvo el inicio de su desarrollo e investigación a partir del año de 1929 con el ruso Solokov. Solokov sugirió el uso cuantitativo de las ondas ultrasónicas para determinar la ubicación de elementos metálicos. Posteriormente, después de la Segunda Guerra Mundial, Firestone de la Universidad de Michigan en Estados Unidos e independientemente Sproule en Inglaterra, sugirieron el uso de detectores de ecos por pulsos ultrasónicos de baja deformación para detectar fallas en materiales homogéneos.

Los equipos de pulso sónico empezaron a ser dotados de geófonos y osciloscopios en el dominio del tiempo. Debido a las mejores características de respuesta, la mayoría de las pruebas de integridad de baja deformación empezaron a usar acelerómetros como dispositivos que detectaban el movimiento en la punta del pilote y la mayoría de los registros obtenidos empezaron a ser analizados en el dominio del tiempo. De igual manera el martillo de mano se empezó a instrumentar para los casos que se deseaba realizar el análisis en el dominio de la frecuencia. Con el posterior desarrollo del registro digital y procesamiento de los resultados, hasta el día de hoy, el análisis de información es posible y sus múltiples aplicaciones han empezado a extenderse. (Hussein 2004)

1.5.1 Equipo

El equipo está compuesto por tres herramientas que son necesarias para llevar a cabo la prueba de integridad de baja deformación: un martillo (con o sin sensor de fuerza), un sensor (acelerómetro o geófono) y un procesador.

El martillo: Dependiendo del tamaño del pilote a ser probado, la masa del martillo debe estar entre 0.5 y 5kg. Los martillos más pequeños brindan un menor pulso y un mayor contenido frecuencial, mientras que los martillos más grandes aplican mayores energías a la cabeza del pilote. Los pulsos de entrada generados por un martillo pequeño, si son claros y angostos, son apropiados para investigar deficiencias de pilotes en distancias cortas a lo largo del fuste en contraste con los pulsos más amplios. Por tanto, los martillos más pequeños son

recomendados para tal fin. Para la evaluación de un pilote largo, como más energía se pierde en la propagación de la onda, se recomienda utilizar martillos más grandes. Actualmente, se tiende a realizar la prueba con diferentes tamaños del martillo.

El pequeño tiende a revelar más detalle sobre los cambios de sección del pilote, mientras el martillo más grande es capaz de generar una reflexión de onda más clara en la punta del mismo. El sensor de presión está localizado entre la masa del martillo y la superficie de impacto, mientras que el acelerómetro está pegado rígidamente a la cabeza del pilote. Típicamente, la fuerza medida es mil veces mayor que el peso del martillo, por tanto, los martillos más grandes alcanzan un valor pico momentáneo de hasta 50kN. (Rausche 1992)

El sensor del Movimiento: Los sensores de movimiento son acelerómetros o geófonos. La información de aceleración obtenida con el acelerómetro contiene implícitamente información de la velocidad al ser integrada posteriormente. Por su parte, los geófonos producen de manera directa una señal de velocidad. Tanto los acelerómetros como los geófonos tienen diferentes propiedades en diferentes rangos de frecuencias. Los acelerómetros, por ejemplo, brindan resultados más confiables en frecuencias altas. Los geófonos tienen un rango de frecuencia más bajo, pero no requieren los cálculos de una constante de integración. Los geófonos son generalmente más pesados que los acelerómetros y por tanto presentan mayor dificultad en el momento de realizar la prueba. (Rausche 1992)

Procesadores: La pantalla de la unidad especializada muestra menús intuitivos para guiar al usuario y muestra las señales gráficas para interpretación en campo. El "Colector PIT" en las condiciones de señal del martillo y los sensores de movimiento, guardan la información para una posterior transferencia al computador que luego ejecuta los cálculos para su interpretación y elaboración de graficas de los datos procesados.

1.5.2 Normatividad del ensayo

Según (BEIM 1998) el Ensayo PIT es normalizado por las siguientes normas internacionales:

- Alemania (Recomendación de la DGGT para futura inclusión en la norma DIN)
- Australia (AS2159-1995)
- China (JGJ 93-95)
- Estados Unidos (ASTM D-5882-96)

- Francia (Norme Française NFP 94-160-2; NFP 94-160-4)
- Inglaterra (Specification for Piling - Institution of Civil Engineers - capítulo 11.2)

1.5.3 Ventajas y desventajas del PIT

El ensayo PIT tiene ventajas que lo hicieron muy popular:

- Ejecución muy rápida. Con los pilotes preparados, se hacen más de 50 ensayos por día.
- Es capaz de detectar daños en la superficie del fuste.
- No exige preparación durante la ejecución del pilote. Así, puede ser hecho en cualquier pilote de la obra.
- Equipamiento liviano y portátil.
- Para obtener informaciones sobre la integridad de los pilotes, el PIT es sin duda la más rápida y barata.

En contrapartida, ese ensayo tiene algunas desventajas y limitaciones:

- Poca precisión en la evaluación de la intensidad del daño. Ello puede hacer con que sean detectados daños que no comprometerían la utilización del pilote, con consecuente pérdida de tiempo para la obra.
- Dificultad de detección de un segundo daño abajo de una grande variación de características del material del pilote.
- Difícil interpretación de las señales obtenidas en algunos casos.
- Imposibilidad de distinguir entre variación de área de sección y variación de calidad del hormigón (peso específico y/o módulo de elasticidad).
- Limitación de longitud del pilote.
- En casos donde existen juntas mecánicas o grietas que atraviesan la sección del pilote, la onda no puede cruzar tal discontinuidad.
- Debido a su naturaleza, el ensayo no brinda ningún tipo de información relativa a la capacidad de carga del pilote.
- Dificultad de detección de daño muy próximo de la punta. (García 2010)

1.6 Características del ensayo.

El ensayo de integridad de pilotes por el método sónico, se basa en la propagación a lo largo del fuste del pilote, de una onda de compresión producida por un martillo de mano en la cabeza

del pilote. Esta onda es reflejada por las discontinuidades del pilote, por la punta del pilote, por cambios de sección o por variaciones del tipo de terreno que lo rodea. Los movimientos consiguientes de la cabeza del pilote son captados por un acelerómetro. La señal del acelerómetro es amplificada y digitalizada por un sistema electrónico y convertida en medida de velocidad, que se presenta inmediatamente en la pantalla de un microcomputador portátil. El ensayo PIT es ideal para pilotes moldados "in situ", excepto pilotes inyectados bajo presión.

Determinación de la velocidad de propagación de la onda

El frente de onda que se genera en el punto de impacto realmente tiene forma esférica, pero a una distancia de unos 2 diámetros se puede considerar como un frente de onda plano que se transmite por el cilindro a una velocidad:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Exp. 1.19

Siendo: E, el módulo de elasticidad dinámico del material
ρ, la densidad
c, la velocidad de propagación

Cuando hay cambio geométrico o de características del material que se constituye el pilote o un cambio importante de la rigidez del terreno, parte de la energía se refleja hacia la cabeza de éste. (García 2010)

Determinación de la impedancia

Los cambios en las características geométricas o en las propiedades del material que lo constituyen y que producen ecos que permiten diagnosticar el estado del pilote son el área de sección transversal del pilote, densidad del material y/o módulo de elasticidad o velocidad de transmisión de la onda en el material.

Estos aspectos se engloban en el término Impedancia y que se define como:

$$z = \rho \cdot c \cdot A$$

Exp.1.20

Siendo: z, la impedancia de una sección del pilote
ρ, la densidad del material

c , la velocidad de propagación de la onda de compresión
 A , el área de la sección transversal

La impedancia se puede también expresar como:

$$z = \frac{E \cdot A}{c}$$

Exp. 1.21

Siendo: E , el módulo de elasticidad dinámico del material

Como la densidad suele variar relativamente poco de una zona a otra, aunque haya cambios importantes de las propiedades del material, los dos parámetros que más afectan al valor de la impedancia de la sección son c y A , y principalmente este último.

Por lo tanto, con las reflexiones del Eco se estarán registrando variaciones en la velocidad y sobre todo en el área transversal de los pilotes ensayados. (García 2010)

Determinación de la profundidad

El gráfico de velocidad de propagación de la onda, a través del fuste de un pilote continuo, aparece en la pantalla como una línea relativamente horizontal, con dos picos, que indican el inicio causado por el impacto del martillo y el final del pilote, causado por la reflexión de la onda en el final del pilote, que es el primer cambio de impedancia que se produce.

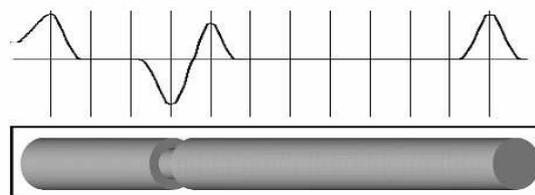


Figura 1.4. Ejemplo esquemático de la señal de respuesta para un pilote. Prueba PIT

Se pueden identificar un pico positivo inicial correspondiente al pulso de entrada debido al impacto del martillo. Al cabo de un tiempo la velocidad regresa a tomar un valor de cero hasta alcanzar la reflexión en la punta donde se registraría un pulso similar al de entrada que puede ser positivo o negativo en algunos casos. Positivo cuando el pilote se encuentra en un suelo relativamente blando y negativo cuando la punta del pilote se encuentre apoyada por una roca o estrato de alta rigidez. (Caballeros 2003)

La reflexión que llega a la cabeza del pilote habrá recorrido una distancia $2L$, siendo L la longitud del pilote. Al registrar con un acelerómetro en la cabeza del pilote el tiempo, t , que ha tardado la onda en volver a la cabeza tras el impacto y se conoce la velocidad, c , de transmisión de las ondas de compresión en el hormigón (de 3500 a 4000 m/s), se puede calcular la longitud del pilote como:

$$L = \frac{c \cdot t}{2}$$

Exp. 1.22

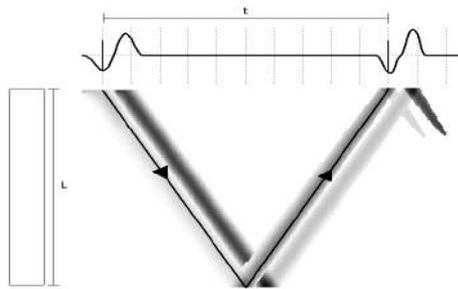


Figura 1.5. Curva teórica del método sónico

1.6.1 Preparación del pilote para el ensayo

Para la realización de este ensayo se deben tener en cuenta los diferentes factores:

- Los pilotes deben estar descabezados o accesibles al menos en parte en el momento del ensayo, y sin presencia del agua.
- El hormigón no tendrá, en general, menos de una semana en el momento del ensayo. Para la realización del ensayo se requiere que la cabeza del pilote sea de hormigón sano y compacto, para que la onda no refleje en discontinuidades.
- El acelerómetro es fijado posteriormente sobre la superficie preparada con una pequeña película de pasta suave.
- Es recomendable disponer de un plano con la identificación de los pilotes, su longitud aproximada, y posibles incidencias durante su construcción.
- Se necesita conocer las características geotécnicas del suelo atravesado por el pilote, para facilitar la interpretación.

Luego de haber realizado los pasos anteriores se realizan diferentes golpes con el martillo de mano desde una misma altura procurando que sean realizados con la misma energía de impacto. (Likins 2000)

1.6.2 Realización del ensayo en obra

Una vez se ha preparado el pilote para ser ensayado:

- Se limpia con una escobilla de mano.
- Se coloca el acelerómetro sobre la cabeza del pilote, procurando que quede lo más vertical posible, y en una zona compacta de hormigón.
- Indicamos en el programa informático el nombre de referencia del pilote y la profundidad esperada de proyecto.
- Sujetamos con firmeza el acelerómetro y lo conectamos a través del programa.
- Con el martillo de mano, golpeamos suavemente la cabeza del pilote, hasta que obtengamos gráficas suficientes que nos aporten información para su interpretación.
- De todas las gráficas obtenidas, el programa hace una gráfica que es la media de todas, y cuando detecta que por más gráficas que hagamos, la media no varía, nos indica que podemos parar de golpear el pilote.
- Procedemos a interrumpir la lectura del acelerómetro, si lo moviéramos sin desconectarlo, nos produciría gráficas erróneas.
- Observamos la gráfica media obtenida, y nos aseguramos de que nos de un resultado de profundidad aproximado al que esperábamos.
- Si la gráfica obtenida tiene muchas oscilaciones, no nos da un final claro, o nos detecta una anomalía en el pilote, podemos repetir el ensayo para asegurarnos.
- Una vez tengamos unas graficas válidas, procedemos al guardado de la información para su posterior interpretación en gabinete.

Durante el ensayo, se debe tener en cuenta algunas consideraciones especiales de ubicación del golpe del martillo y localización del acelerómetro que pueden afectar las señales obtenidas. (Likins 2000)

1.6.3 Influencia del terreno de cimentación

El principio del ensayo sísmico se basa en el análisis de las ondas reflejadas por cambios significativos en las propiedades del pilote. También tiene influencia el entorno geotécnico en los resultados obtenidos por esta técnica y las variaciones en las propiedades del pilote.

- Atenuación:

La dificultad del análisis de señal con estas técnicas proviene de que la amplitud de la onda generada por el impulso con el martillo en la cabeza y que se transmite a lo largo del pilote para

volver a la cabeza se atenúa, complicando la recepción y análisis de resultados. La atenuación se produce principalmente por la disipación de la energía en el terreno que rodea el pilote. Esta disposición de energía afecta a la amplitud de la onda que se refleja, imposibilitando a veces detectar la señal reflejada desde el fondo de éste.

La atenuación de la señal depende de la esbeltez del pilote, es decir de la relación longitud/diámetro (L/D) y de la rigidez del terreno. En terrenos blandos o sueltos pueden interpretarse bien los registros de pilotes con esbeltez de hasta 30:1 o superiores. Si el terreno es rígido puede ser muy difícil analizar los registros de pilotes con esbeltez incluso inferiores a 20:1.

- Cambios de impedancia:

Aparte de la atenuación, los cambios de impedancia en el propio pilote serán los que dificulten el análisis de resultados, pero a la vez serán los que nos proporcionen información del estado de integridad. Las variaciones de impedancia son las que nos darán información del estado del pilote. Para que sean detectables con estas técnicas y los equipos empleados, las variaciones de impedancia deben ser al menos de un 20%.

La variación puede ser debida tanto a un aumento como a una disminución de impedancia. Se pueden detectar normalmente variaciones de Impedancia de un 20% lo que supone por ejemplo una reducción de diámetro de entorno del 10% sobre la sección o también variaciones en la velocidad de propagación del hormigón del orden del 20%. Realmente detectar cambios menores es difícil de observar ya que no se aprecian variaciones significativas.

La técnica de integridad por el método sónico, no es capaz de detectar cambios graduales de impedancia. Es evidente que del análisis de los resultados no se podrá proporcionar información ni sobre la verticalidad del elemento ni sobre la capacidad portante del pilote. (García 2010)

1.6.4 Acciones Correctoras

En caso de existir un pilote con defectos se llevan a cabo una serie de actividades correctoras como:

1. Los pilotes calificados como rechazables o cuestionables, pueden ser sustituidos por otros, a criterio de la dirección facultativa.

2. Los pilotes calificados como cuestionables pueden ser sometidos a pruebas y ensayos complementarios, tales como pruebas de carga estáticas o dinámicas, o sondeos con recuperación de testigo continuo del hormigón, ensayos cross-hole o excavación perimetral si los defectos no están a gran profundidad.
3. Las acciones correctoras pueden consistir en inyecciones a presión a través de perforaciones en el hormigón del pilote, en micropilotes perforados dentro del pilote, u otras.
4. En el caso de defectos en la parte superior del pilote, se puede demoler dicha zona y volver a reconstruir. En todos los casos se puede volver a realizar el ensayo sónico de los pilotes reparados. (Caballeros 2003)

1.6.5 Informes de resultados.

El ingeniero responsable del ensayo dispondrá de 48 horas después de finalizados los ensayos, para facilitar los resultados finales y la evaluación de la integridad de los pilotes, al menos en forma de avance del informe.

Datos generales a incluir en el informe definitivo son:

- Nombre de la obra y localización
- Resumen de la estratificación geotécnica
- Tipología de los pilotes ensayados. Diámetro, longitud, sistema constructivo, edad del hormigón, empalmes en su caso
- Incidencia durante la construcción
- Descripción del aparato utilizado en el ensayo.
- Fecha de realización de los ensayos. Localización de los pilotes ensayados, adjuntando croquis o plano en caso necesario.

1.7 Empleo de Modelación Matemática en la determinación de capacidad de carga sobre pilotes.

Existe la necesidad de evaluar la capacidad resistente de las cimentaciones de los puentes que llegan a Cayo Cruz, Camagüey y determinar la carga máxima a la cual pueden ser explotados. Debido a que dos de estos puentes presentaron fallos estructurales se hace necesario el estudio de la cimentación utilizada, para poder reutilizarla en caso que presenten un buen estado constructivo.

Para la solución de este problema real se le puede dar uso a la modelación matemática basada en métodos numéricos como el Método de los Elementos Finitos (MEF), se pueden modelar los elementos estructurales que conforman los puentes, y estimar su resistencia estructural, todo lo cual queda avalado por la realización de pruebas de carga a escala real, lo cual permite definir las cargas de trabajo del puente.

A través de la modelación matemática basada en el Método de los Elementos Finitos (MEF) se establece un modelo en el cual se cuantifica y evalúa la capacidad de carga de las cimentaciones sobre pilotes. La modelación en 3D de cada estructura permite determinar la redistribución de cargas en un puente en función de su configuración. Se estudia la cimentación de los puentes, fijándonos en la estratificación presente, y por el tiempo que lleva construido esta obra de infraestructura no se conoce con exactitud la longitud real de los pilotes, por lo que se analizan una cantidad considerable de casos, determinado la capacidad de carga y se establece la respuesta de la cimentación bajo los diferentes sistemas de cargas, así como el comportamiento de las pruebas de carga que se realizaría en el lugar. Se modela además el fenómeno de la distribución de esfuerzos en la cimentación (interacción suelo - estructura), estableciendo recomendaciones prácticas para evaluar este fenómeno.

Por otra parte, se aportan nuevos criterios y coeficientes, basado en la modelación matemática, lo que significará una reducción de los gastos de investigación ya que prácticamente se eliminará el uso de los costosos ensayos de laboratorio y/o campo, utilizando las pruebas de cargas para la calibración del modelo.

Con los resultados que se obtienen de la modelación matemática se demuestra su racionalidad en la revisión de los puertos, por otro lado, se demuestra que es factible con la aplicación de la modelación matemática. (Caballero 2007)

1.8 Empleo de las PIT en obras reales

Estudio de los pilotes del puente No 3 en Cayo Cruz, Camagüey utilizando las PIT para determinar la longitud y los cambios de impedancia pertinente.



Figura 1.6 Aplicación de las PIT en Camagüey

Estas pruebas mostraron que la mayoría de los pilotes se encontraban en buen estado y empotrados en roca, por lo que pueden ser usados como base en la reconstrucción de los puentes.

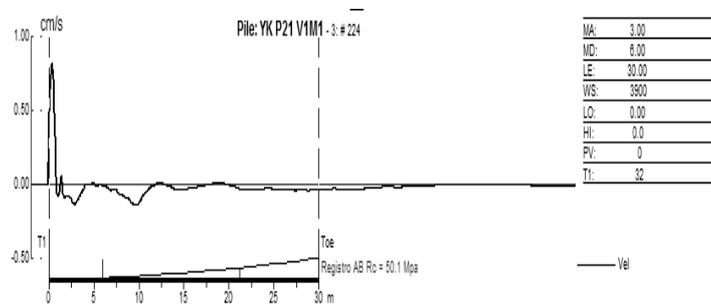


Figura 1.7 Reflectograma del pilote No 21, puente 3

Se realizaron 256 registros en los 24 pilotes del Puesto No 3

Encontrado en García (2010) Estudio sobre ensayos de integridad estructural de pilotes: Métodos y Ejemplos de interpretación de resultados, se muestran ejemplos reales para analizar cómo se muestran las pruebas de integridad de pilotes.

Ejemplo 1, Corresponde a pilotes que se encuentran en buen estado.

Se presentan unos reflectogramas realizados en varios pilotes de la cimentación de una obra en Barcelona. Los ensayos mostraron reflectogramas “perfectos”, porque se observa una gráfica con una línea más o menos recta, con una curva inicial hacia abajo que marca el golpe de martillo en la cabeza del pilote, y otra curva final, que indica el rebote de la onda sónica en el final del pilote. Este es un caso ideal, porque son pilotes realizados cerca de un río, donde el terreno es arenoso y debido a que el rozamiento lateral del pilote con el terreno es muy bajo, la onda viaja exclusivamente a través del fuste del pilote.

En otros casos donde hay terrenos arcillosos, por ejemplo, se debe amplificar la señal, para poder verla con claridad, porque por el rozamiento del pilote con el terreno, se pierde parte de la onda.

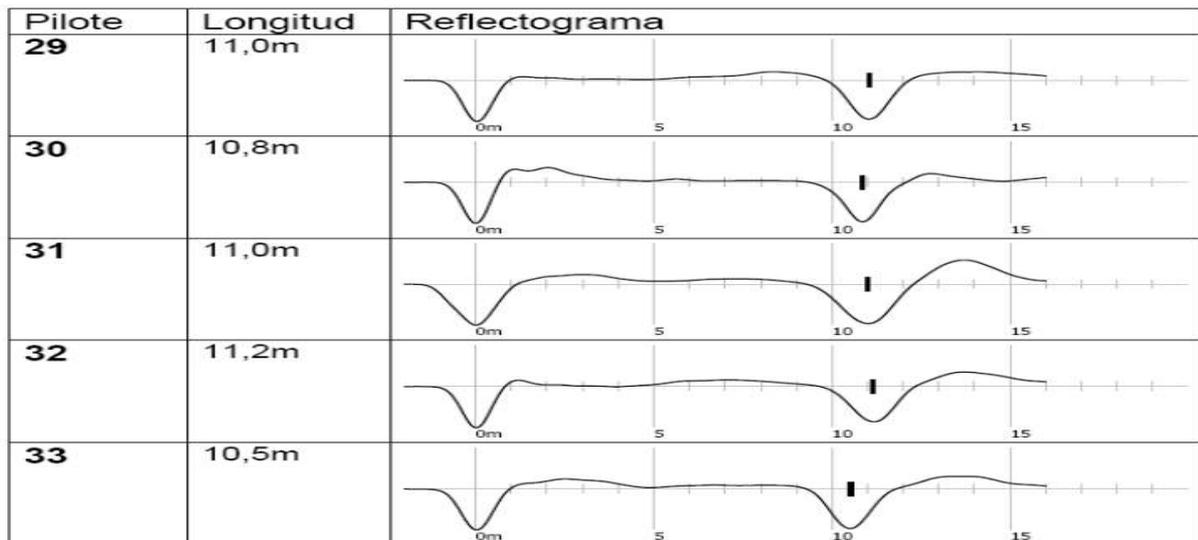


Figura 1.8 Reflectogramas de la cimentación de una obra en Barcelona

Como resultado no se observa ninguna anomalía, y por tanto se interpreta que los pilotes son continuos y no tienen cambios en su sección transversal. Este resultado es óptimo por la influencia del suelo presente en la zona y la buena ejecución que presentaron los pilotes.

Ejemplo 2, Corresponde a pilotes que presentan problemas.

Corresponde a los pilotes de la cimentación de una obra civil de carretera, en el estribo de un puente en Girona, que tienen una profundidad estimada de proyecto de 15 metros. El terreno es arcilloso según el estudio geotécnico, por lo que ofrece un rozamiento alto con el pilote, además en la cota final de los pilotes existe una capa de gravas. Debido al tipo de terreno, se tiene que amplificar la señal para poder obtener unas gráficas en las que poder obtener una interpretación, y a causa de ello, la señal tiene bastante "ruido".

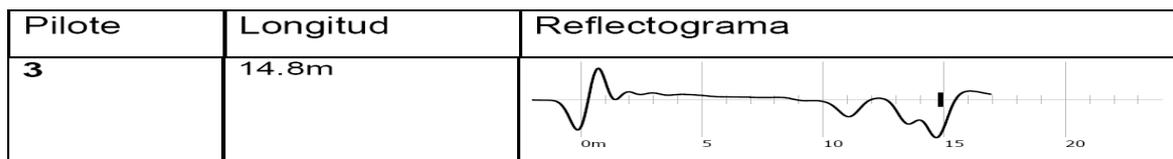


Figura 1.9 Reflectograma de un puente en Girona (Pilote # 3)

En este caso el final del pilote se puede interpretar que se encuentra a 15 metros aproximadamente. No obstante, a 11 metros de profundidad, la gráfica tiene una curva hacia abajo, lo que nos indica que podría haber una pequeña disminución de sección en este punto.

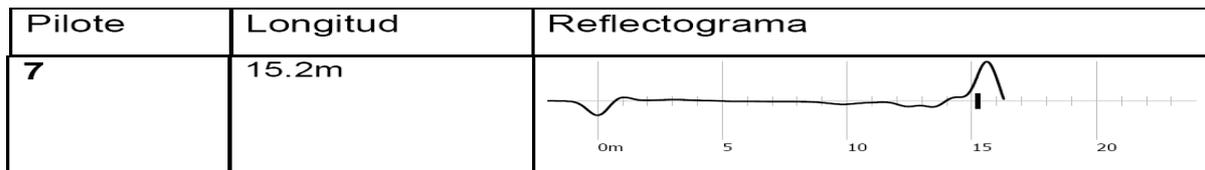


Figura 1.10 Reflectograma de un puente en Girona (Pilote # 7)

Muestra que al final del pilote una curva o pico hacia arriba. Esto normalmente indica que el pilote está empotrado, de suceder esto, se produce un cambio de polaridad de las ondas (inicio con una curva hacia abajo y el final con una curva hacia arriba). Observando el informe geotécnico de la zona, el terreno presenta capas de gravas. Se puede interpretar que, si el hormigón era fluido, puede que en la zona final del pilote se haya filtrado a través de las gravas parte de hormigón, y lo que nos indica en este final, es que se produce un ensanchamiento de la sección.

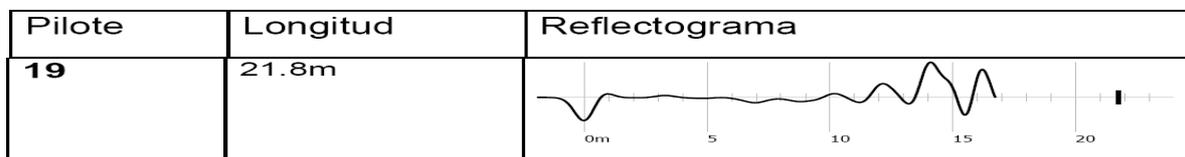


Figura 1.11 Reflectograma de un puente en Girona (Pilote # 19)

En este caso no podemos ver el final del pilote, ya que en el final tiene oscilaciones muy abruptas, esto es producto en muchos casos al descabezado del pilote que se observa en obra que tiene varias fisuras que producen rebotes en la onda. Como se ha explicado anteriormente las PIT muestran en sus resultados consecuencias que afectan directa o indirectamente el pilote y lo refleja en los reflectogramas.

Ejemplo 3, Corresponde errores de construcción, que afectaron la integridad de estos pilotes. Se muestran unos reflectogramas en los que no se puede detectar la profundidad de los pilotes, a pesar de que en longitud se indique un cierto valor, éste no tiene validez, ya que es la

profundidad que el programa marca, pero si se observan las gráficas, no se puede interpretar que sea la longitud correcta.

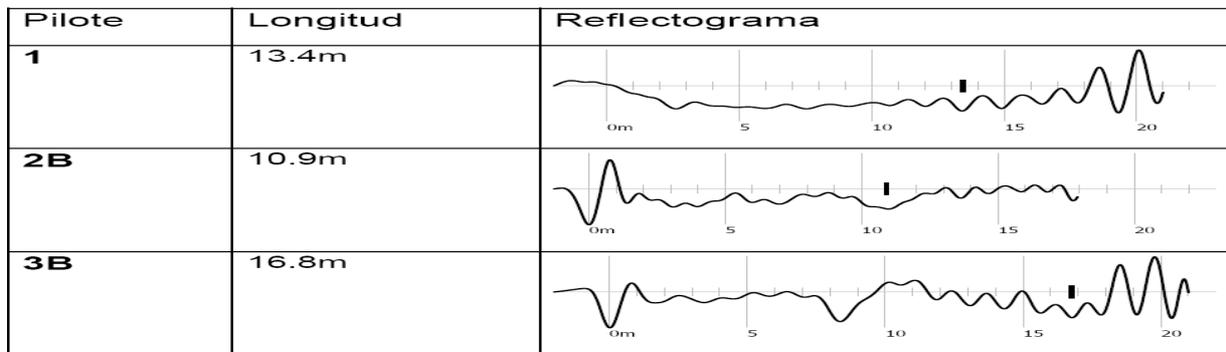


Figura 1.12 Reflectogramas de pilotes que presentaron errores de construcción (Pilote # 19)

En este caso, al no poderse interpretar con claridad los resultados, se indagó sobre la construcción, y se indicó, que estos pilotes se habían construido a nivel de calle, y actualmente se encontraban unos 3 metros por debajo de esta cota. Se preguntó sobre la forma de descabezar estos pilotes, y se habían tirado abajo con una retroexcavadora. Esta forma de tirar los pilotes, provoca que aparezcan fisuras por el resto del fuste del pilote que impiden que la señal de ensayo viaje por el pilote y por eso se observan este tipo de reflectogramas.

1.9 Conclusiones parciales.

Después de analizados los ensayos de carga no destructivo y la problemática presentada en los puentes de Cayo Cruz, Camagüey podemos arribar a las siguientes conclusiones parciales:

1. Las PIT son una importante herramienta para determinar la longitud real de pilotes fundidos in situ.
2. Existen en la literatura internacional múltiples expresiones para el cálculo de la capacidad de carga de pilotes en roca.
3. Combinando las PIT con la Modelación Matemática se puede determinar la capacidad de carga de los pilotes en los puentes de Cayo Cruz, Camagüey.

Capítulo 2.

Capítulo 2. Estudio Patológico Puente No 1 y No 3. Pedraplén Jigüey - Cayo Romano

2.1 Generalidades.

En este epígrafe se presentan los resultados del estudio patológico de la cimentación realizada para el proyecto de reconstrucción del Puente No 1 y No 3, ubicado en el Pedraplén Jigüey-Cayo Romano- Cayo Cruz existente y ubicado en el municipio Esmeralda de la provincia de Camagüey.

2.2 Objetivos.

El Estudio Patológico abarca solamente los elementos de la infraestructura (pilotes) y dada la situación existente se plantearon los siguientes objetivos:

- Determinar integridad y longitud de los pilotes.
- Evaluación del hormigón y armadura de los pilotes
- Capacidad soportante por métodos analíticos.

2.3 Información Básica

Descripción del área de estudio

El acceso se efectúa por la vía de categoría I de carácter nacional que conduce a Cayo Cruz (Pedraplén Jigüey-Cayo Romano-Cayo Cruz). En la actualidad la mayoría de los puentes no están en funcionamiento realizándose la transportación hacia los cayos por los desvíos existentes. A continuación, se muestra la ubicación del puente No 1.



Figura 2.1 Pedraplén Jigüey – Cayo Romano.

Descripción del proyecto

La vía existente (Pedraplén Jigüey-Cayo Romano-Cayo Cruz), está sometida en la actualidad a un proceso de reconstrucción. En esta se contempla la reparación del Puente No 1, ubicado entre las estaciones 295+1.10 y 297+1.10 del trazado. Fue diseñado y construido en la década del 80 con una solución de luces de 1 x 20 m para una longitud total de 20 m. Este puente no será ampliado. Posee además las siguientes características:

- cimentación indirecta, con pilotes fundidos in situ, sin recuperación de camisa
- \varnothing de los pilotes de aproximadamente 0.60 m.
- pilotes por yugo para un total de 16 pilotes

Una foto del puente y un esquema con la distribución de los yugos y pilotes se muestran a continuación:



Figura 2.2. Puente No 1 del Pedraplén Jigüey – Cayo Romano.

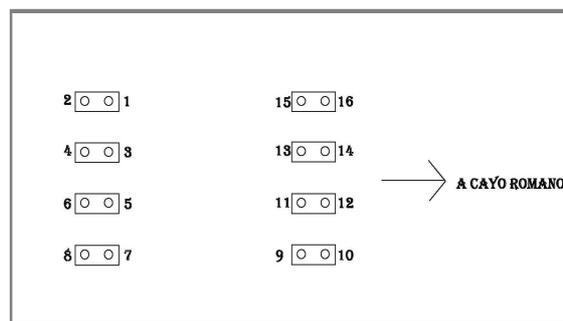


Figura 2.3. Esquema de la distribución de los yugos (8) y pilotes (16).

- Realización de ensayos in situ para evaluar los materiales
- Realización de ensayos de integridad de los pilotes (PIT)
- Realización de ensayos de laboratorio

Trabajos Topográficos.

Fueron realizados por el Equipo de Topografía de la UIC Camagüey. La base plano-altimétrica fue creada en forma de poligonometría, proyectándose una poligonal, dejando en su recorrido 4 vértices. Todos los trabajos se realizaron con la Estación Total Leica TCR 805. Las coordenadas y cotas de los pilotes se muestran en la tabla siguiente:

Realización de ensayos in situ para evaluar los materiales.

Estos exámenes se realizaron a los materiales constituyentes de los pilotes e incluyeron: Localización de armadura y distribución del acero de refuerzo, medición de la pérdida de sección del refuerzo, medición de potenciales de corrosión, determinación de la profundidad de carbonatación y PH, todos ejecutados por el Equipo de Investigaciones de Ciego de Ávila.

Ultrasonido, realizado por el Equipo de Patología de la UIC Habana.

A excepción del ultrasonido efectuado sobre la cabeza de los pilotes, el resto de los ensayos fueron realizados sobre la parte superior del pilote empotrada en los yugos, como se muestra en la foto siguiente.



Figura 2.5. Yugo 3, pilotes 5 y 6

La distribución de acero, recubrimiento y pérdida del diámetro del refuerzo, fueron evaluadas por medición directa. Para la realización del ensayo de Potencial de Corrosión, se utilizó el equipo COR MAP II de la firma James Instruments. Con el objetivo de determinar la

profundidad de carbonatación en el concreto se requirió de una solución indicadora ácido-base de Fenolftaleína al 1%. Para la medición del PH se empleó el equipo PH Kit Concrete.

Los volúmenes de trabajo se muestran a continuación:

Tabla 2.1. Volúmenes de ensayos in situ a los materiales constituyentes de los pilotes

Ensayo	Cantidad	Observaciones
Pérdida de sección de la armadura	6	
Medición del refuerzo y recubrimiento	14	
Potencial de corrosión	14	Durante la realización de estos trabajos no se había extraído el yugo 8, pilotes 15 y 16.
Ensayo de Fenolftaleína	14	
PH	14	
Ultrasonido	8	Realizados sobre cabeza de pilotes

Realización de ensayos de integridad de los pilotes (PIT)

El PIT (Pile Integrity Tester) es un ensayo que busca principalmente determinar la variación a lo largo de la profundidad de las características del hormigón de pilotes de fundación (ASTM D5882). El método de bajo impacto o PIT, requiere de un impacto ligero, como el de un martillo de mano en el cabezal del pilote. Este impacto genera una onda que es detectada en el cabezal mediante un acelerómetro. Posteriormente esta onda viaja por todo lo largo y ancho del pilote y al llegar a sus fronteras (paredes y punta) se provocan reflexiones que regresan la energía hacia el cabezal, donde nuevamente son detectadas por el acelerómetro. Se realizaron ensayos en los 16 pilotes del Puente No 1.



Figura 2.6 Equipo de Pile Integrity Tester de la Pile Dynamics Inc.



Figura 2.7 Cajón para la realización de los trabajos para el ensayo PIT.

Realización de ensayos de laboratorio.

Estos ensayos permitieron evaluar el hormigón e incluyeron:

- Ensayo de ultrasonido y resistencia a compresión sobre probetas de hormigón endurecido ejecutados por el Laboratorio de Materiales de la UIC Villa Clara.
- Ensayo de Porosidad realizados por el Laboratorio de Materiales de la UIC Camagüey
- Concentración de cloruros efectuados por el Laboratorio de Materiales de la UIC Habana.



Figura 2.8 Equipo de Ultrasonido

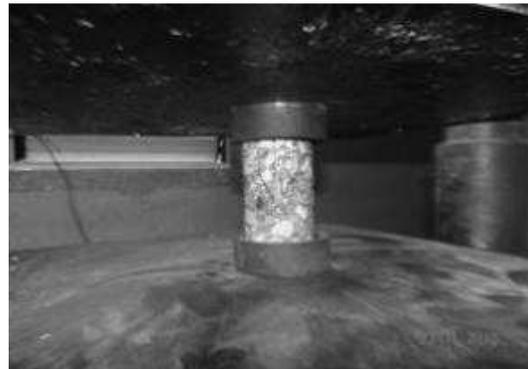


Figura 2.9 Ensayo de compresión axial

Los volúmenes de trabajo se muestran a continuación:

Tabla 2.2. Volúmenes de ensayos in situ a los materiales constituyentes de los pilotes

Actividad (Ensayos laboratorio)	UM	Cantidad
Rc Hormigón endurecido (NC 724:2009)	Ensayos	18
Porosidad		13
Ultrasonido		18
Concentración de cloruros		18

2.5 Resultados de la evaluación del hormigón de los pilotes.

El ensayo de ultrasonido permite verificar la uniformidad y calidad relativa del hormigón, así como detectar fallas internas introducidas durante la ejecución. La resistencia a compresión permite establecer una evaluación general de la estructura, desde el punto de vista de vulnerabilidad y de la capacidad resistente.

Los resultados que se muestran a continuación fueron ejecutados en las probetas de hormigón endurecido extraídas de las cabezas de los pilotes empotradas en los yugos.

Tabla 2.3. Resultados de ensayo a compresión y ultrasonido sobre las probetas.

No	ELEMENTO	RESISTENCIA	VELOCIDAD
		CORREGIDA. MPa.	(m / s)
1	Yugo 1-1	47.1	4070,00
2	Yugo 1-1	43.6	3538,00
3	Yugo 1-2	50.0	3565,00
4	Yugo 1-2	55.4	4591,00
5	Yugo 2-3	21.5*	3923,00
6	Yugo 2-4	49.6	3875,00
7	Yugo 2-4	41.7	4015,00
8	Yugo 3-5	47.2	3969,00
9	Yugo 3-6	40.4	3974,00
10	Yugo 4-7	49.9	4083,00
11	Yugo 4-8	50.6	3553,00
12	Yugo 5-9	54.0	3969,00
13	Yugo 5-10	50.0	3763,00
14	Yugo 6-11	47.0	4127,00
15	Yugo 7-13	41.1	4275,00
16	Yugo 7-14	38.0	4420,00
17	Yugo 7-15	49.1	4000,00
18	Yugo 8-16	48.8	3928,00

Según se observa en la muestra estadística, el 100 % de los valores presenta una resistencia a la compresión superior a 35 MPa, obteniéndose un valor promedio de 47.5 MPa (Resistencia estimada a compresión de 52.8 MPa) que se corresponde con hormigones durables. (DURAR)

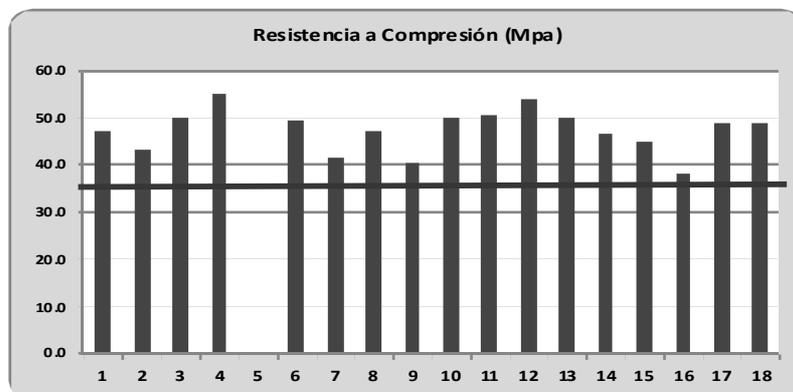


Figura 2.10. Resistencia a Compresión del Hormigón

Así mismo los resultados del ensayo de ultrasonido realizado sobre las probetas de hormigón endurecido muestra que toda la muestra estadística (18 datos) presenta valores por encima de 3500 m/s. (RC 9002, DURAR)

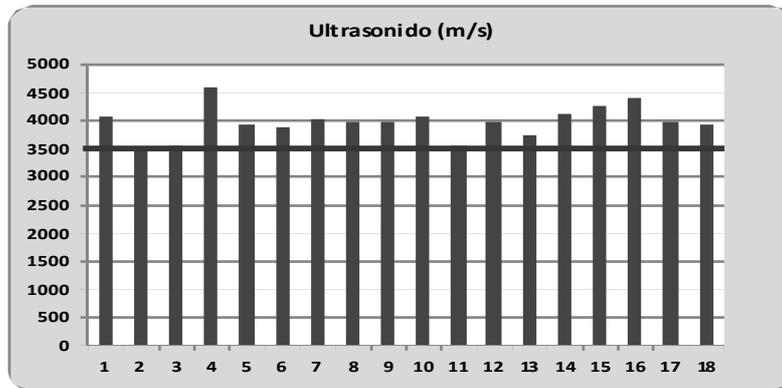


Figura 2.11. Resultados del ensayo de ultrasonido

Profundidad de Carbonatación y PH

La carbonatación es la reducción de la alcalinidad normal del hormigón por el efecto del CO₂. El objetivo que se persigue con estos ensayos es determinar el avance de la carbonatación en el hormigón por el método de vía húmeda con solución de indicador acido-base de Fenolftaleína, que permite determinar pH entre 8.2 y 9.8. Como se observa en la foto, el indicador de fenolftaleína presenta coloración roja púrpura, lo que indica valores de pH ≥ 9.8 , por lo que concluye que no existe carbonatación del hormigón. Esto fue comprobado en los resultados obtenidos con el medidor de pH (pH Kit Concrete).

En la foto se observa el estado de conservación de la armadura, la cual no presenta signos de corrosión, a pesar de encontrarse en la zona de oscilación de la marea.



Figura 2.12. Obsérvese color rojo púrpura del ensayo de fenolftaleína.



Figura 2.13. Obsérvese el estado de conservación de la armadura.

En la tabla siguiente se muestran los resultados de pH. Como se puede apreciar el 100 % de la muestra estadística presenta valores por encima de 8, valor mínimo para que exista corrosión del acero. (DURAR)

Tabla 2.4. Resultados de ensayo de pH.

No	PILOTE	PH
1	1-1	9.57
2	1-2	9.26
3	2-3	9.44
4	2-4	9.38
5	3-5	8.62
6	3-6	8.79
7	4-7	9.26
8	4-8	9.32
9	5-9	9.32
10	5-10	9.42
11	6-11	9.11
12	6-12	9.56
13	7-13	10.78
14	7-14	9.92
15	8-15	-
16	8-16	-

Nota: El primer número es el yugo, el segundo el número del pilote según esquema de la Figura 2.3, así 3-6 indica yugo 3, pilote 6.

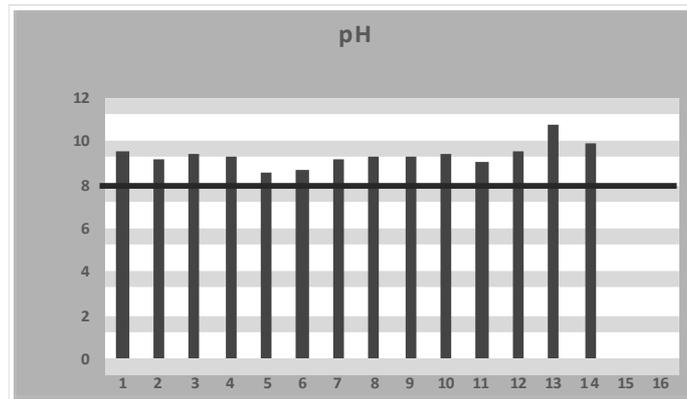


Figura 2.14. Resultados de pH

Porosidad

La porosidad es una medida de la compacidad del hormigón. En la tabla siguiente se presentan los resultados de este ensayo de laboratorio. Como se expone, el total de la muestra estadística contiene valores por debajo del 10 %, lo que indica un hormigón de buena calidad y compacidad. (DURAR)

Tabla 2.5. Resultados del ensayo de Porosidad.

No	PILOTE	Porosidad (%)
1	1-1	4.19
2	1-2	4.91
3	2-3	6.18
4	2-4	5.19
5	3-5	6.93
6	3-6	5.68
7	4-7	5.55
8	4-8	4.58
9	5-9	2.42
10	5-10	3.94
11	6-11	3.59
12	7-13	6.59
13	8-16	5.17

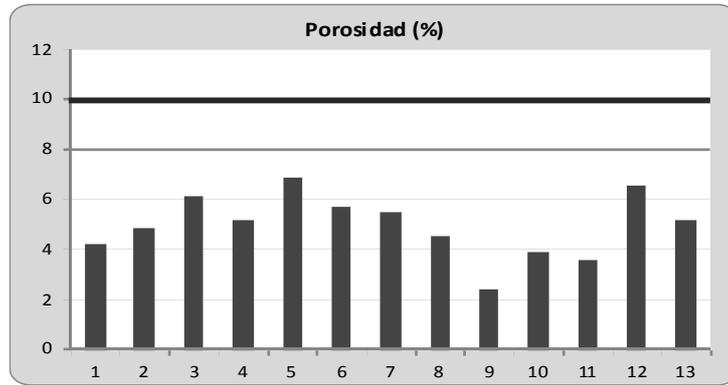


Figura 2.15. Comportamiento de la porosidad en el hormigón

Concentración de cloruros

El objetivo de este ensayo es la determinación de la concentración de cloruros, presentes en la masa de hormigón a diferentes niveles de profundidad, resultados que permiten el cálculo del coeficiente de difusión del cloruro hacia el interior y con ello la velocidad de penetración del mismo en el tiempo. Los resultados de laboratorio se exponen a continuación:

Tabla 2.6. Resultados del ensayo cloruros.

Pilote	NaCL (%)	CL- (%)
1-1 (1)	0.1073	0.0651
1-1 (2)	0.1056	0.0641
1-2 (1)	0.1040	0.0631
2-3	0.1023	0.0621
2-4 (1)	0.1018	0.0618
2-4(2)	0.1032	0.0626
3-5	0.1007	0.0611
3-6	0.0099	0.0601
4-7	0.1015	0.0616
4-8	0.0998	0.6059
5-9	0.1012	0.0614
5-10	0.1009	0.0612
6-11	0.0974	0.0591
6-12	0.0957	0.0581
7-13	0.1051	0.0638
7-14	0.1049	0.0630
8-15	0.0941	0.0571
8-16	0.0933	0.0566

Como se puede apreciar los resultados de CL- oscilan entre 0.0566 y 0.0651 %, valores menores al 0.1% (en peso de hormigón) valor límite permisible para estructuras de hormigón armado. (CONVECTECT. GEOCISA.)

2.6 Resultados de la evaluación de la armadura de los pilotes.

El objetivo de este ensayo es medir el potencial de la armadura del hormigón mediante el uso de electrodos de referencia. Los resultados de este ensayo informan sobre la posibilidad de corrosión de la armadura de una estructura de hormigón.



Foto 2.16. Medición del potencial en uno de los pilotes

Tabla 2.7. Potenciales de corrosión.

No	PILOTE	POTENCIAL DE CORROSION (mV)
1	1-1	-285
2	1-2	-361
3	2-3	-263
4	2-4	-260
5	3-5	-381
6	3-6	-200
7	4-7	-308
8	4-8	-263
9	5-9	-344
10	5-10	-312
11	6-11	-293
12	6-12	-287

13	7-13	-254
14	7-14	-391
15	8-15	-
16	8-16	-

Nota: El primer número es el yugo, el segundo el número del pilote según esquema de la Figura # 1, así 3-6 indica yugo 3, pilote 6.

Como se observa en la tabla anterior el 79 % de la muestra estadística presenta valores entre -200 y -350 mV, situación incierta, (ASTM C 876-91). Hay que señalar que estos elementos estuvieron expuestos al aerosol marino por varios días, lo que pudiera haber afectado los resultados.

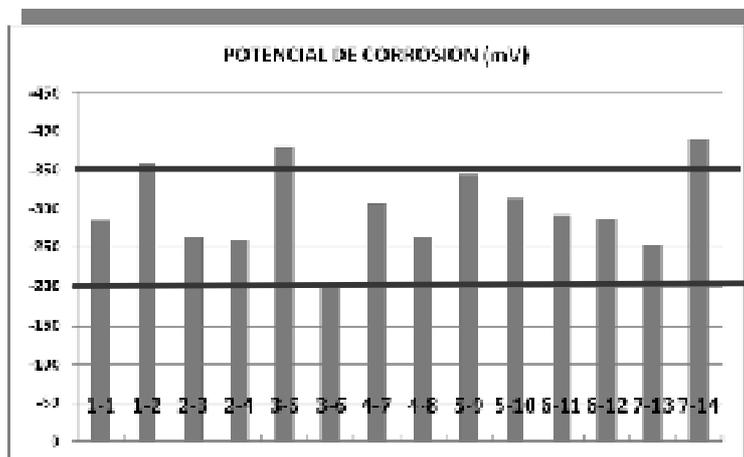


Figura 2.17. Potencial de Corrosión.

Distribución de la armadura y recubrimientos.

En las mediciones realizadas en todas las cabezas de los pilotes se obtuvieron los siguientes resultados:

- Barras de refuerzo principal: 10 barras de $\varnothing = 25$ mm @ entre 10.0 y 19.0 cm
- Cercos: $\varnothing = 10$ mm
- Recubrimiento: Mínimo: 20 mm, Máximo: 130 mm. El 88% de los pilotes tienen recubrimiento mínimo entre 25 y 35 mm y máximo entre 55 y 90 mm.
- \varnothing pilote: entre 59.0 y 68.0 cm.

2.7 Resultados del Ensayo de Prueba de Integridad PIT en los pilotes de cimentación. Puente 1

Se ejecutaron pruebas en los 16 pilotes de cimentación del puente en cuestión (Puente No 1). A los mismos se les realizó la prueba PIT cumpliendo los requerimientos de la norma ASTM D 5882 tomando en 4 puntos diferentes y un total de 320 registros por elemento.

Los ensayos se realizaron colocando un acelerómetro de sensibilidad uniaxial paralelo al eje del pilote de hormigón (una vez la superficie estaba limpia y seca) y se generó la onda impactando de manera perpendicular a la superficie. En la secuencia de imágenes siguiente se observa el procedimiento de la prueba.

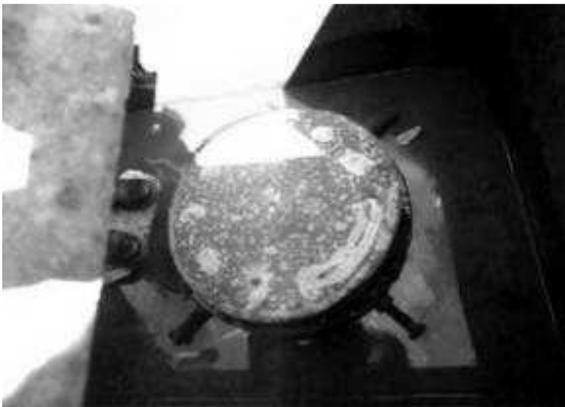


Figura 2.18. Superficie del pilote preparada para la prueba



Figura 2.19. Colocación del acelerómetro



Figura 2.20. Martillo empleado



Figura 2.21. Equipo PIT empleado

Los resultados obtenidos de la prueba PIT en cada pilote se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 2.8. Resumen de los resultados. Puente 1

Flote	Longitud estimada (m)	Calidad	Observaciones
1	10	Pilote Bueno, sin defectos	Flote columna, apoyado en roca
2	10	Pilote Bueno, sin defectos	Flote columna, apoyado en roca
3	10	Pilote Bueno, sin defectos	Flote columna, apoyado en roca
4	10	Pilote Bueno, sin defectos	Flote columna, apoyado en roca
5	10	Pilote Bueno, sin defectos	Flote columna, apoyado en roca
6	10	Pilote Bueno, sin defectos	Flote columna, apoyado en roca
7	10.2	Pilote con posible defectos	Flote columna, apoyado en roca
8	3.2	Pilote con posible defectos	Flote flotante
9	10.0	Pilote con posible defectos	Flote columna, apoyado en roca
10	10.0	Pilote Bueno, sin defectos	Flote columna, apoyado en roca
11	10.0	Pilote Bueno, sin defectos	Flote columna, apoyado en roca
12	8.0	Pilote Bueno, sin defectos	Flote columna, apoyado en roca
13	7.0	Pilote Bueno, sin defectos	Flote flotante
14	11.0	Pilote con posible defectos	Flote flotante
15	7.0	Pilote con posible defectos	Flote flotante
16	7.0	Pilote Bueno, sin defectos	Flote columna, apoyado en roca

2.8 Resultados del Ensayo de Prueba de Integridad PIT en los pilotes de cimentación. Puente 3

Se ejecutaron cierta cantidad de registros en varios puntos de la superficie de la cabeza de cada uno de los 24 pilotes de cimentación del Puente No 3. El procedimiento de ensayo se ejecutó según la norma ASTM D 5882 como promedio se ensayaron 4 puntos por pilote intercambiado la ubicación del acelerómetro y del punto donde se aplicaba el golpe. En total se obtuvieron 479 Registros.

Los ensayos se realizaron colocando un acelerómetro de sensibilidad uniaxial paralelo al eje del pilote de hormigón (una vez la superficie estaba limpia y seca) y se generó la onda impactando de manera perpendicular a la superficie. En la secuencia de imágenes siguiente se observa el procedimiento de la prueba.

Los resultados obtenidos de la prueba PIT en cada pilote se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 2.9. Resumen de los resultados.

Yugo	Pilote	Registro PIT	Clasificación Registro PIT	Longitud del Pilote M	Observaciones
A	P-1	YAP132V1	PD	15	Defecto a 11 m
A	P-2	YAP2VIM2	AA	15	Pilote sano empotrado en roca
B	P-3	YBP3V1M1B	AA	16	Pilote sano empotrado en roca
B	P-4	YBP4V+F	PDFx	17	Defecto en 13 m
C	P-5	YCP5128V+F	AB	16	Pilote sano empotrado en roca
C	P-6	YCP62M2	AB	16	Pilote sano empotrado en roca
D	P-7	YDP7V1M6II	AB	15	Pilote sano empotrado en roca
D	P-8	YDP81V1M1	AA	15	Pilote sano empotrado en roca
E	P-9	YEP9VM1	AA	17	Pilote sano empotrado en roca
E	P-10	YEP10V1M1	AA	17	Pilote sano empotrado en roca
F	P-11	YFP11VM2	AA	17	Pilote sano empotrado en roca
F	P-12	YFP12VM2	PDFx	17	Defecto en 12 m
G	P-13	YGP13V+F	AA	17	Pilote sano empotrado en roca
G	P-14	YGP14V+F	AA	17	Pilote sano empotrado en roca
H	P-15	YHP15VM2	AA	17	Pilote sano empotrado en roca
H	P-16	YHP16VM2	AA	17	Pilote sano empotrado en roca
I	P-17	YIP17V1M1	AA	17	Pilote sano empotrado en roca
I	P-18	YIP18V1M1	AA	17	Pilote sano empotrado en roca
J	P-19	YJP19V+F	AA	17	Pilote sano empotrado

					en roca
J	P-20	YJP20VM2	PDFx	16	Defecto en 4 m
K	P-21	YKP21V8M2	PDFx	17	Defecto en 5 m
K	P-22	YKP22VM2	PDFx	17	Defecto en 5 m
L	P-23	YLP23V1M1	PDFx	17	Defecto en 5 m
L	P-24	YLP24M1	PDFx	17	Pilote sano empotrado en roca

La evaluación y clasificación de los registros tuvo los siguientes resultados:

En todos los pilotes se obtuvieron registros interpretables de buena calidad. En 13 pilotes se obtuvo con claridad la señal de la reflexión procedente de la punta del pilote sin la presencia de alguna reflexión intermedia que indique una disminución de la impedancia que pueda asociarse con defectos que disminuyan la capacidad de carga del pilote (Registro AA).

En otros tres pilotes no se identifica con claridad la señal de la reflexión procedente de la punta del pilote pero no se presentan reflexiones intermedias que indiquen disminución de la impedancia o defectos que disminuyan la capacidad de carga del pilote (Registro AB) sino que se presenta una reflexión intermedia por aumento de la impedancia que el autor la asocia con la interacción suelo pilote donde comienza el empotramiento del mismo en la roca, muy débiles se aprecian reflexiones que pudieran asociarse a la punta del pilote correspondientes a una longitud de 17 metros.

En 5 pilotes se aprecian reflexiones intermedias por disminución de la impedancia del pilote (Registros PDFx), no son disminuciones bruscas de la impedancia y el autor las asocia con disminución leve de la sección del pilote o resistencia del hormigón, pero existe continuidad estructural porque se recibe bien la señal de la reflexión procedente de la punta del pilote y se puede determinar con seguridad su longitud.

2.9 Análisis de la capacidad soportante de los pilotes. Puente 1

En este análisis no se incluyen los pilotes evaluados con posibles defectos, ya que en estos la capacidad soporte no depende exclusivamente de la interacción suelo estructura y de las condiciones geológicas del sitio. Estos defectos son exclusivamente problemas de ejecución que afectan la resistencia estructural del elemento. Para estos se recomiendan pruebas adicionales. Por esta razón no se incluyen en los cálculos de capacidad soporte los pilotes 7, 8, 9, 14 y 15.

Para el resto de los pilotes se hace el siguiente análisis de cimentación:

Pilotes 1 al 6: Según los resultados del PIT estos pilotes tienen una longitud que oscila entre 5.2 y 5.5 m, con cotas al pie del pilote (punta) entre 5.34 y 5.79. De acuerdo a la cala más cercana a estos (Cala No 1), estos se encuentran empotrados sobre un lente de roca caliza de 1.40 m de espesor que apoya sobre un estrato más débil de arcilla muy plástica ($C_u=0.1$ MPa), con gravas según se observa en la columna litológica (Cala No 1) siguiente.

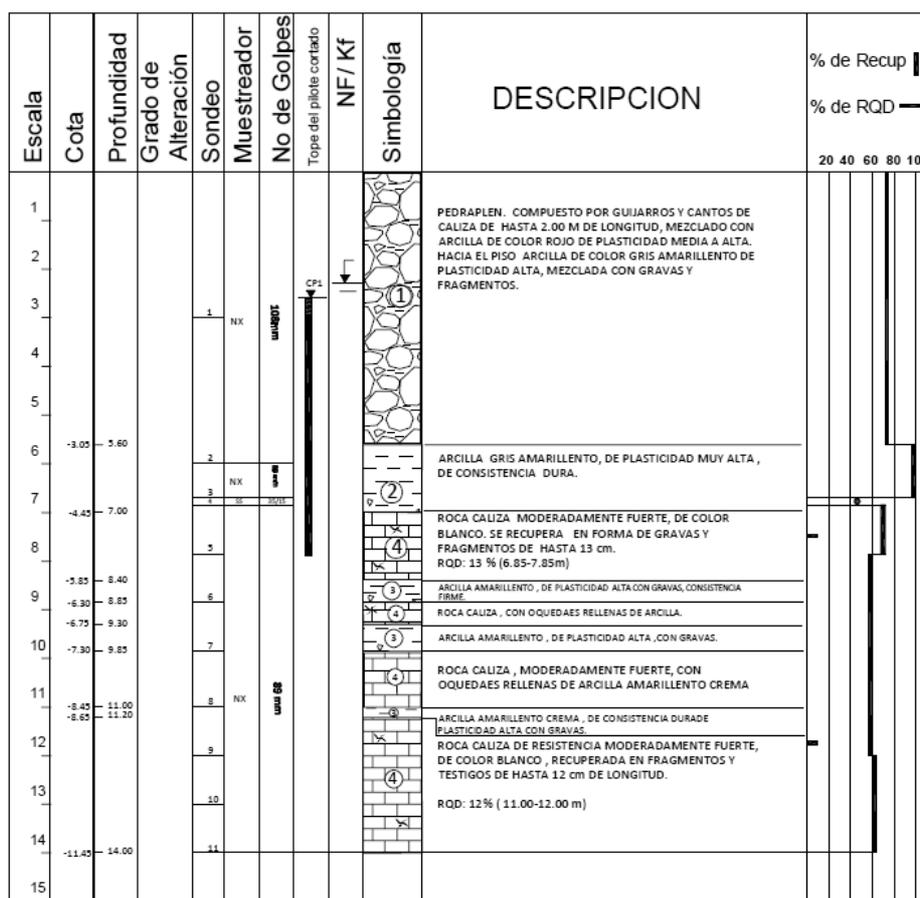


Figura 2.22. Estratigrafía de la zona en estudio

En la tabla siguiente se resumen las condiciones de apoyo de estos pilotes

Tabla 2.10. Resumen de las condiciones de apoyo de los pilotes del 1 al 6. Puente 1

Pilote	Longitud estimada (m)	Cota de la cabeza del pilote	Cota del pie del Pilote	Longitud de empotramiento Le en la roca (lente)	Espesor de roca bajo la punta(m)
1	5.3	-0.04	5.34	0.89 m	0.51
2	5.3	-0.07	5.37	0.92 m	0.48
3	5.4	-0.10	5.50	1.05 m	0.35
4	5.4	-0.28	5.68	1.23 m	0.17
5	5.5	-0.29	5.79	1.34 m	0.06
6	5.2	0.35	5.55	1.10 m	0.30

Como se muestra en la tabla anterior, todos los pilotes cumplen con la longitud de empotramiento mínima (1 diámetro), oscilando entre 1.48 diámetro (1.4 D) y 2.23 diámetro (2.23 D). No, así como el espesor bajo la punta de 3 diámetros (3 D), oscilando entre 0.28 D y 0.85 D. Por todo lo anterior el cálculo de la capacidad soportante de estos pilotes se realiza considerando solamente al aporte de la fricción del empotramiento en la roca teniendo en cuenta la existencia de una capa de arcilla por debajo de la roca. No se considera resistencia en fuste debido a que la camisa no es recuperada. Teniendo en cuenta esto se obtienen los siguientes resultados:

$$\text{Torne (1977)} \quad \tau_{adm} = 0.05(\rightarrow 0.1) \cdot \sigma_c$$

Con $\alpha = 0.05$

$$\text{Hooley y Lefroy (1993)} \quad \tau_{adm} = \alpha \cdot \sigma_c^{0.5} \quad (\tau_{adm} \text{ y } \sigma_c \text{ en MPa})$$

Con $\alpha = 0.3$

Tabla 2.11. Carga admisible considerando resistencia en fuste de la roca.

Pilote	Longitud de empotramiento Le en la roca (lente)	Qtr adm (kN) Torne (1977)	Qtr admr (kN) (Holey y Lefroy (1993))
1	0.89 m	500	134.7
2	0.92 m	500	139.2
3	1.05 m	590	158.9
4	1.23 m	690	186.2
5	1.34 m	750	202.8
6	1.10 m	610	166.5

σ roca= 18 MPa, K_{sp} = 0.10. Puente 1

Los resultados obtenidos evidencian una gran diferencia entre los mismos. En el caso de Torne (1977) se sobrestima la capacidad de carga del pilote. Sin embargo, considerando un factor de seguridad $FS = 3$ se acerca a los obtenidos por Holey y Lefroy (1993).

2.10 Conclusiones y recomendaciones parciales.

Los resultados del estudio patológico llevan a concluir que los pilotes de cimentación presentan un riesgo de corrosión bajo que está dado por:

1. Resistencia a compresión del hormigón $R_c > 25$ MPa lo que indica hormigones durables
2. Valores de ultrasonido superiores a 3500 m/s correspondiente a hormigones de calidad Alta.
3. No existencia de carbonatación ni de concentraciones de iones cloruros a nivel de armadura
4. Porosidades menores al 10 %, indicativo de hormigones de buena calidad y compacidad
5. Concentración de iones cloruros (CL-) inferior al valor límite permisible para estructuras de hormigón armado.
6. No existencia de pérdida de sección del acero. Potenciales de corrosión con baja probabilidad de corrosión, debido a la no existencia de corrosión por carbonatación, ni iones despasivantes al nivel de armadura.
7. Los resultados del PIT indican la existencia de pilotes con posibles defectos que afectan la resistencia estructural de estos.
8. Los resultados del PIT indican la existencia de problemas en la ejecución de los pilotes, que conjuntamente con la geología del sitio, crean un alto nivel de incertidumbre en los

resultados aquí presentados. A esto se le añade la no existencia de documentación con historial de construcción de esta cimentación.

9. Los defectos en los pilotes no son claros, por lo que es necesario llevar a cabo pruebas de integridad adicionales o revisiones detalladas de los registros de ensayos PIT.
10. En caso de que los posibles defectos persistan, será necesario llevar a cabo pruebas de carga y sondeos directos sobre los pilotes de extracción de núcleos para poder descartar dichos pilotes.
11. Debido a la existencia de variaciones significativas en la estratigrafía, por encima de la capa recomendada como competente para empotramiento de los pilotes, se recomienda la realización de calas aledañas a cada batería de pilotes para comprobar los resultados obtenidos con los ensayos PIT.
12. Las conclusiones y recomendaciones establecidas en el presente informe son sólo aplicables para el sitio y construcción estudiada, de ninguna manera se puede aplicar a otras áreas para otros fines.

Puente 1

1. El puente No 1 se asienta sobre una estructura geológica compleja representada por, arcillas muy plásticas con contenido variable de gravas, intercaladas con capas de roca caliza distribuidas al azar con oquedades y resistencia también variable, generalmente baja.

Puente 3

1. Los resultados del PIT indican que en los pilotes 4, 12, 20,21,22,23 y 24 existen defectos por disminución de la impedancia acústica, la cual se asocia a disminución de la sección del pilote o de la resistencia del hormigón. Estos defectos tienen un carácter leve.
2. Los resultados del PIT indican que todos los pilotes están trabajando empotrados en la roca.
3. Los resultados del PIT indican en todos los registros reflexiones de aumento de la impedancia acústica relacionadas con la interacción camisa pilote o pilote-camisa-suelo.

Nota: varias de estas conclusiones se corresponden con los informes emitidos por la ENIA Nacional

Capítulo 3.

Capítulo 3: Determinación de la Capacidad de Carga.

3.1 Introducción.

La capacidad de una cimentación sobre pilotes para soportar cargas o asentamientos, depende de forma general de la resistencia por el fuste del pilote y de la resistencia por la punta del mismo. Para el caso que se analiza es específico ya que son pilotes fundidos en roca o suelo, y esto lo diferencia de la capacidad de carga de otros tipos de pilotes. Si se requieran garantías excepcionales es recomendable realizar pruebas de carga sobre los pilotes construidos. Los cálculos asociados al estudio de las cimentaciones profundas son poco precisos, y por ello, la realización de pruebas de carga "in situ" resulta especialmente recomendable. Las pruebas de carga deben realizarse sobre pilotes de tamaño semejante (longitud y diámetro) a aquellos en cuyo estudio vayan a aplicarse los resultados; de esa forma no será necesario introducir imprecisiones importantes a la hora de considerar el efecto escala. Las pruebas de carga deben realizarse sobre pilotes construidos en terrenos semejantes (preferiblemente, en la propia obra) al caso en estudio y, sobre todo, deben ser construidos con técnicas análogas. La cimentación sobre pilotes de los puentes de Jigüey, Cayo romano, Cayo Cruz no ha sido sometida a pruebas de carga, solamente se le realizaron pruebas de integridad de pilotes para conocer el estado y longitud de los mismos con el fin de calcular su capacidad de carga y poder comprobar si pueden ser utilizados como cimentación en la reconstrucción de estos puentes.

3.2 Análisis de los informes ingeniero geológicos. Puente 1

Según el análisis de los informes ingeniero geológicos en la zona existen varios suelos y rocas que están en contacto con los pilotes, en una primera cala se verifica la presencia de un relleno de 5.6 metros con arcilla y roca caliza por debajo del mismo. El puente 1 al presentar una sola luz de 20m consta de 2 estribos donde el perfil de suelo cambia bruscamente (Figura 3.2).

Las características del suelo que está en contacto con los pilotes se pueden describir como una primera capa de arcilla de color amarillo de plasticidad media a alta con un $C=100$ kPa y una segunda capa de roca caliza que es donde algunos de los pilotes están apoyados con $\sigma_c=18$ MPa.

Capítulo 3. Determinación de la capacidad de carga

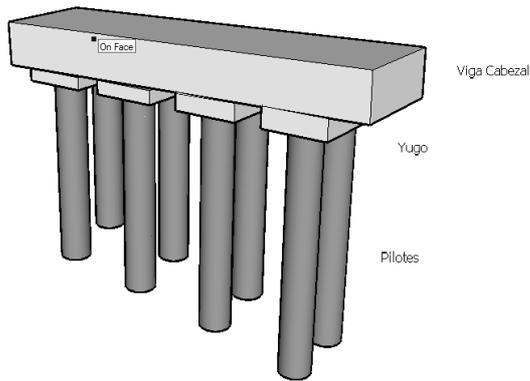


Figura 3.1. Configuración de un estribo

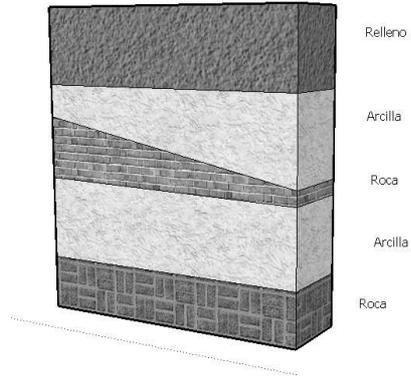


Figura 3.2. Perfil geológico

Teniendo en cuenta la complejidad del perfil geológico del lugar a continuación se presentan los perfiles de cada pilote según el Informe Ingeniero geológico.

Escala	Cota	Profundidad	Grado de Alteración	Sondeo	Muestreador	No. de Golpes	Topo del pilote cortado	NF / Kf	Simbología	DESCRIPCION	% de Recup	% de RQD			
											20	40	60	80	100
1									(1)	PEDRAPLEN. COMPUESTO POR GUIJARROS Y CANTOS DE CALIZA DE HASTA 2.00 M DE LONGITUD, MEZCLADO CON ARCILLA DE COLOR ROJO DE PLASTICIDAD MEDIA A ALTA. HACIA EL PISO ARCILLA DE COLOR GRIS AMARILLENTO DE PLASTICIDAD ALTA, MEZCLADA CON GRAVAS Y FRAGMENTOS.					
2															
3				1	NX										
4															
5															
6	-3.05	5.60		2					(2)	ARCILLA GRIS AMARILLENTO, DE PLASTICIDAD MUY ALTA, DE CONSISTENCIA DURA.					
7	-4.45	7.00		3	NX				(3)	ROCA CALIZA MODERADAMENTE FUERTE, DE COLOR BLANCO. SE RECUPERA EN FORMA DE GRAVAS Y FRAGMENTOS DE HASTA 13 cm. RQD: 13 % (6.85-7.85m)					
8				4					(4)	ARCILLA AMARILLENTO, DE PLASTICIDAD ALTA CON GRAVAL CONSISTENCIA FIRME.					
9	-5.85	8.40		5					(5)	ROCA CALIZA, CON OQUEDAES RELLENAS DE ARCILLA.					
10	-6.30	8.85		6					(6)	ARCILLA AMARILLENTO, DE PLASTICIDAD ALTA, CON GRAVAS.					
11	-6.75	9.30		7					(7)	ROCA CALIZA, MODERADAMENTE FUERTE, CON OQUEDAES RELLENAS DE ARCILLA AMARILLENTO CREMA.					
12	-7.30	9.85		8	NX				(8)	ARCILLA AMARILLENTO CREMA, DE CONSISTENCIA DURADE PLASTICIDAD ALTA CON GRAVAS.					
13	-8.45	11.00		9					(9)	ROCA CALIZA DE RESISTENCIA MODERADAMENTE FUERTE, DE COLOR BLANCO, RECUPERADA EN FRAGMENTOS Y TESTIGOS DE HASTA 12 cm DE LONGITUD. RQD: 12% (11.00-12.00 m)					
	-8.85	11.30		10					(10)						

Figura 3.3. Columna estratigráfica Pilote 1. El pilote apoya en roca (estribo izquierdo)

Capítulo 3. Determinación de la capacidad de carga

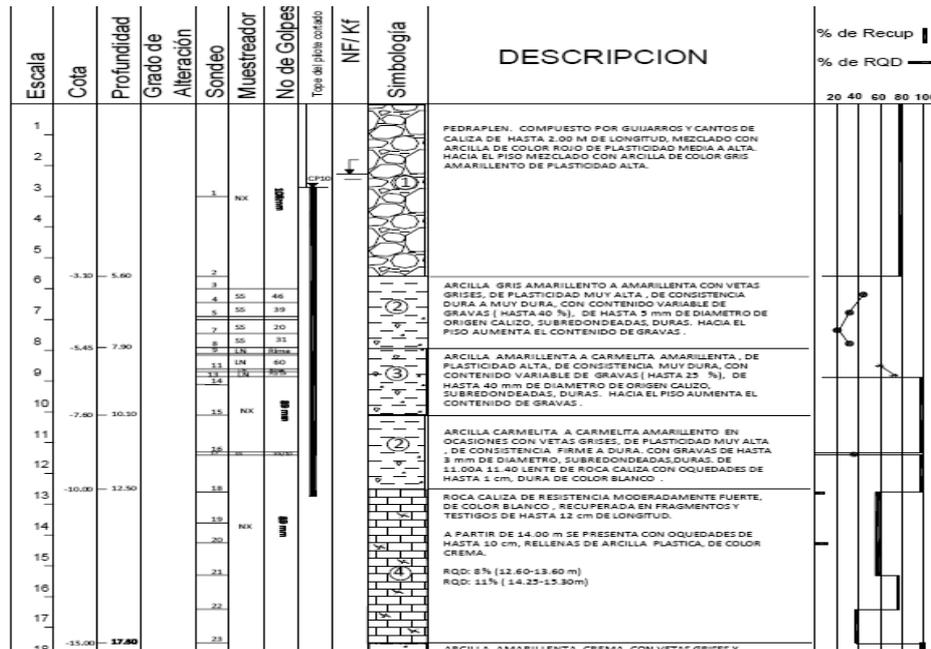


Figura 3.4. Columna estratigráfica Plote 10. El pilote apoya en roca (estribo derecho)

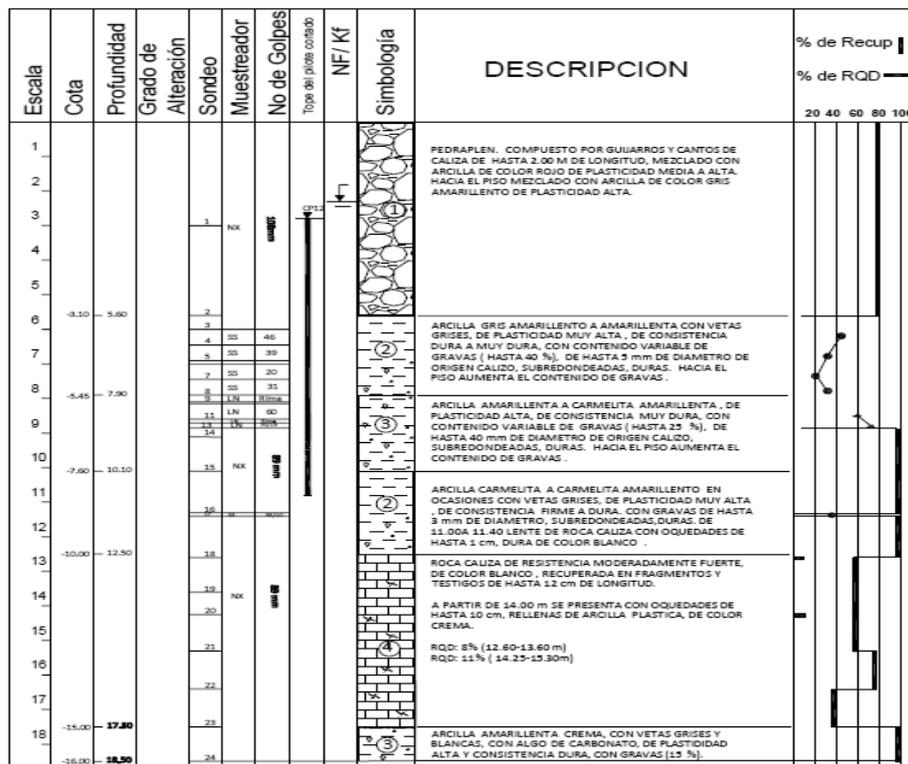


Figura 3.5. Columna estratigráfica Plote 12. El pilote apoya en suelo (estribo derecho)

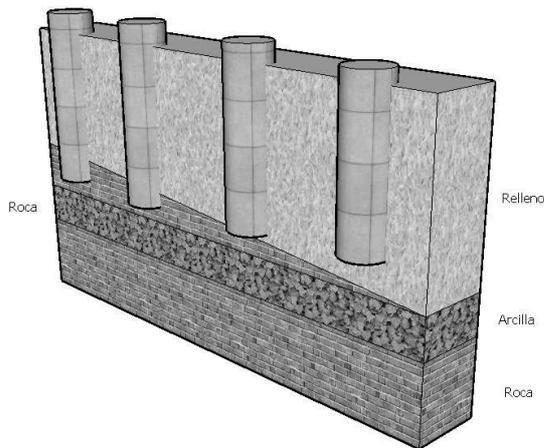


Figura 3.6. Estribo izquierdo

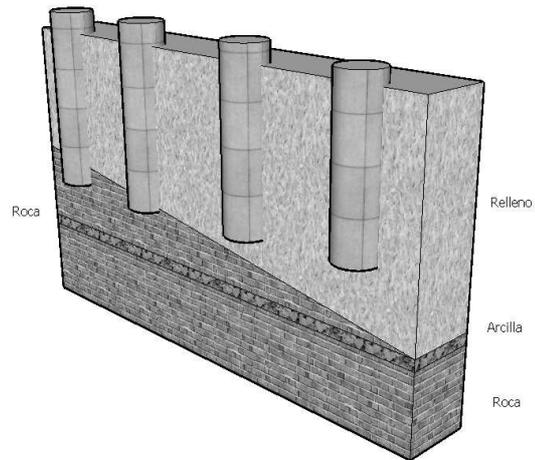


Figura 3.7. Estribo derecho

3.3 Modelación por métodos numéricos.

En este epígrafe se estudia el efecto del espesor de la roca bajo la punta del pilote para el cálculo de la capacidad de carga. De los informes ingeniero geológicos se destaca que varios pilotes atraviesan el estrato de roca, pero no se logra más de 3D por debajo de la punta del pilote, por lo que se determina la capacidad de carga como pilotes a fricción.

Para la modelación del efecto del espesor de la roca se procede a la utilización del programa PLAXIS (2006), el cual permite modelar pilotes en suelo y a través de algunas simplificaciones modelar la roca como un suelo equivalente.

A la hora de enfrentar cualquier problema ingenieril, estas son las formas de resolverlos y en muchos casos el modelo propuesto solo puede ser soluble con la aplicación de potentes programas de computación con base en diferentes Métodos Numéricos. Diferentes autores coinciden que los procedimientos a la hora de resolver un problema (Sowers 1977) deben seguir la siguiente secuencia:

1. Identificar el problema en su totalidad y después simplificarlo, dividiéndolo en partes y fijando factores significativos.
2. Utilizar las teorías apropiadas con las tolerancias permitidas, impuestas por sus limitaciones.
3. Utilizar modelos físicos o matemáticos cuando se compruebe que las teorías son inadecuadas.
4. Los resultados de los estudios teóricos y con medios deben ser interpretadas a la luz de la experiencia.
5. Las lagunas en el conocimiento del problema deben llenarse intuitivamente.

6. Las soluciones deben ser reevaluadas y revisadas cuando la observación del funcionamiento real de la obra demuestre que son inadecuadas.

Los métodos numéricos son aquellos en los que la solución analítica es inabordable por la complejidad matemática que requiere y que hoy en día con la ayuda del cálculo electrónico se tiene una respuesta rápida. Dentro de estos métodos podemos citar el Método de las Diferencias Finitas y el Método de los Elementos Finitos. En el primero de ellos es preciso, como paso previo, la formulación de la ecuación o sistema de ecuaciones diferenciales que rigen el problema. El principio fundamental del método estriba en sustituir la expresión diferencial por una expresión equivalente en términos de incrementos finitos de las variables. Todas las variables del problema quedan discretizadas. La discretización de las variables geométricas conduce a una subdivisión del dominio mediante una red ortogonal. La discretización de las ecuaciones diferenciales permite obtener expresiones que relacionan los valores de las variables y sus incrementos y por tanto permiten la solución en forma incremental (Jiménez 1986).

Una malla de elementos finitos para la solución de un problema debe tener en cuenta lo esencial de la geometría de la estructura y las capas de suelo que se ponen en contacto para la solución del problema (heterogeneidad de los materiales, presencia de discontinuidad). Pero la malla debe ser en sí, el fruto de un compromiso entre la capacidad de cálculo posible (número máximo de grados de libertad) y la precisión aceptable sobre los resultados numéricos. La malla utilizada debe ser construida considerando los siguientes puntos.

1. Todas las simetrías compatibles con el problema mecánico (geometría, condiciones límites, cargas) deben ser utilizadas a fin de reducir el tamaño del sistema estudiado.
2. La malla debe ser suficientemente fina en las zonas más solicitadas, quiere decir, en las zonas donde existan grandes variaciones de los desplazamientos y las tensiones. Estas variaciones son coaccionadas ya sea por una carga, o por la presencia de una singularidad geométrica (ángulo brusco, cambio de espesor), por los contornos geométricos de fuerte curvatura (cavidades), o también por las características mecánicas localmente muy leves o muy fuertes en correspondencia a este medio ambiente (Mesat 1993 a, b).
3. El tamaño de los elementos debe estar, en la medida de lo posible de tal forma que la relación entre la mayor dimensión del elemento y la menor dimensión este cercana a la unidad. En particular, en las zonas de fuertes gradientes, los triángulos tendrán similitud, en

lo posible, a los triángulos equiláteros, los cuadriláteros a los cuadrados, y los hexaedros a los cúbicos, para no introducir perturbaciones en los cálculos numéricos (distorsión de los elementos).

4. En las zonas menos solicitadas, los elementos de gran tamaño son generalmente colocados en el lugar para alcanzar las fronteras exteriores. No hay reglas precisas para establecer el tamaño de los elementos, es suficiente argumentar un aumento progresivo regular lejos de las zonas sensibles.

La modelación de las obras geotécnicas por los Métodos de los Elementos Finitos se ha hecho posible por un grupo de hipótesis basadas en la geometría de las obras, de su entorno, los materiales y su comportamiento, las cargas, las condiciones límites y las condiciones iniciales. Estas hipótesis, muchas veces simplificadas (pero que deben respetar los fenómenos mecánicos esenciales) han quedado bajo la responsabilidad del ingeniero encargado del estudio. Por otra parte, los resultados obtenidos a través de la modelación demuestran la posibilidad de la utilización de los métodos numéricos para la modelación de las cimentaciones sobre pilotes y la validez de las recomendaciones prácticas abordadas en el trabajo.

En la Facultad de Construcciones se cuenta con programas que trabajan con el método de los elementos finitos entre los que se pueden citar el Geoslope, Plaxis, Abacus, Staad Pro y Sap 2000. Dentro del Paquete Geoslope se encuentra el Sigma/W en el cual se pueden modelar problemas tensionales y deformacionales planos e incluye los modelos de suelo Mohr-Coulomb y Can Clay, entre otros. Su aplicación está relacionada con problemas geotécnicos, lográndose modelar en él mismo ensayos de carga y determinación de cargas de rotura. De todos los sistemas, a pesar de realizar un análisis plano y axial simétrico, es de fácil manejo, y no requiere de un gran número de pasos para definir el modelo. (Ibañez 2001)

El Abacus, considerado como una de la más potente herramienta, permite el análisis en 3D para diferentes modelos de materiales obteniéndose estados tensionales y deformacionales, carga de rotura, etc. En el mismo el mallado es creado por el usuario, incluyendo una gran cantidad de tipos de elementos y permitiendo introducir los criterios de resistencia de los materiales a modelar. De todos los sistemas, a pesar de su versatilidad, es de mayor complejidad en su aplicación, por la cantidad de datos de entrada necesarios para la corrida

El sistema Plaxis, que será el utilizado en este capítulo, permite analizar en 2D y 3D problemas geotécnicos, fundamentalmente relacionados con cimentaciones, presas de tierras y tabla estacas. En el mismo se pueden modelar problemas de capacidad de carga estados tensionales y deformacionales, incluyendo una biblioteca de materiales que describen

fundamentalmente el comportamiento del suelo, el hormigón y el acero. En este sistema es de destacar que el mallado es autogenerado por el mismo, y el usuario, puede en función del problema analizado densificar la malla, lo que se traduce en mayor precisión en los cálculos y requerimiento computacional. (Ibáñez 2001)

La selección del software a utilizar dependerá del tipo de problema a modelar, la capacidad de respuesta computacional (Hardware) y el conocimiento que se tenga del mismo, o sea los datos que son necesarios para su corrida, y los resultados que le brindan en función de las necesidades del ingeniero.

Teniendo en cuenta el problema planteado (efecto del pilote dentro de la roca – aporte en punta) se consultó la bibliografía internacional sobre el tema, la cual es muy escasa (Serrano (2012)). Aunque algunos autores como Tomlinson (1980) evalúan el efecto de un estrato duro y uno blando, solo tiene en cuenta el efecto en el aporte a fricción.

Como se aprecia en la figura 3.8 los diferentes autores coinciden que la zona activa en los pilotes está a $3D$ por debajo de la punta del pilote y la zona pasiva a $6D$ por encima de esta.

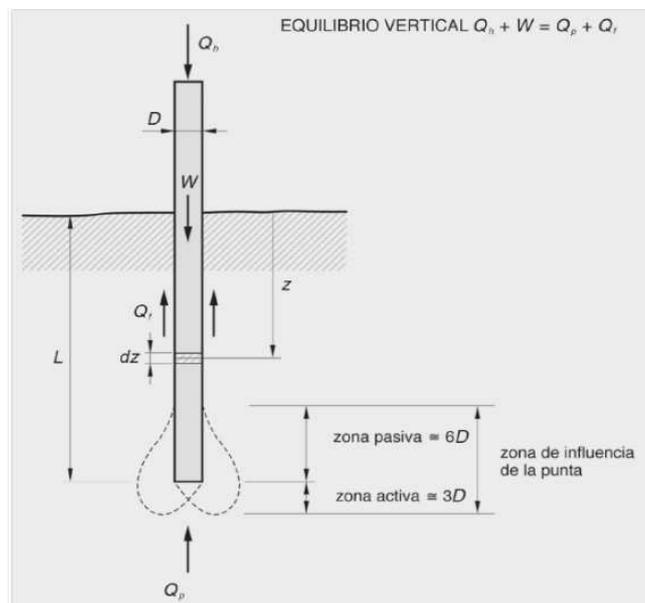


Figura 3.8. Efecto del pilote en la masa de suelo

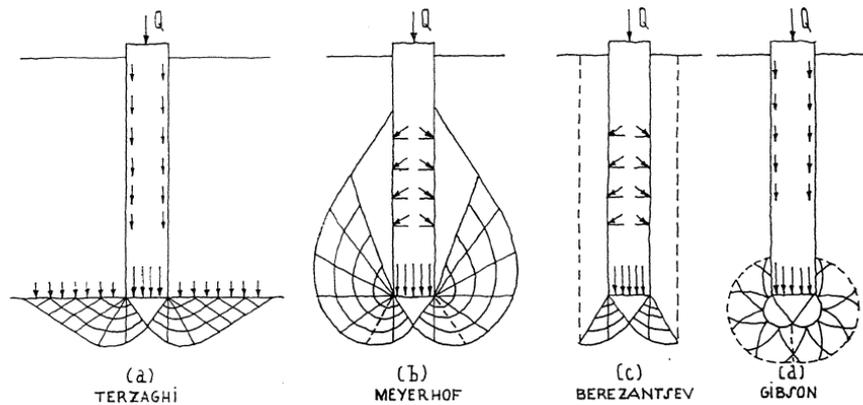


Figura 3.9. Formas de rotura bajo un pilote, según distintos autores.

Las teorías existentes admiten que la carga de hundimiento por punta (σ_{hp}) del pilote en un macizo rocoso, es proporcional a la resistencia de la compresión simple de la roca intacta elevada a un cierto exponente. A esa constante de proporcionalidad, que varía notablemente de unos a otros autores, se le denominará factor de carga y se representará por N_b . De tal forma que la resistencia por la punta propuesta por todo el abanico de teorías podría sintetizarse mediante la expresión:

$$\sigma_{hp} = N_b \cdot \sigma_c^k$$

El valor de k propuesto por las distintas teorías varía entre 0,5 y 1, siendo éste último el valor más utilizado.

En la literatura técnica existe un gran número de teorías lote empotrado en roca. Con el objeto de poder sistematizar el análisis se han agrupado de la manera siguiente:

1. Un primer grupo de teorías, las más simples, son las que sólo consideran la carga de hundimiento como un múltiplo del valor de la σ_c (resistencia a compresión simple de la roca sana) ($k=1$), y proponen distintos valores de N_b .
2. Un segundo grupo de teorías engloba a las que también dependen sólo de σ_c , si bien la relación no es lineal, puesto que respecto del exponente k se supone que es distinto de 1 y en la mayor parte de ellas igual a 0,5.
3. Un tercer grupo de teorías incluyen, además, la calidad de la roca
4. Un cuarto grupo de teorías, incluyen, además de la calidad, el tipo de roca
5. Un quinto grupo de teorías proponen relaciones para la carga de hundimiento, en función de la resistencia a compresión simple, el tipo de roca y el grado de empotramiento del pilote:

Jiménez Salas et al. (1976), proponen que la resistencia por punta del pilote sea proporcional a la resistencia a compresión simple de la roca, donde el factor de proporcionalidad N_σ depende, a su vez, del tipo de roca y del grado de empotramiento; es decir: $\sigma_{tp} = N_\sigma \cdot \sigma_c$, siendo:

$$N_\sigma = \beta (0,5 + (D_e / (6 \cdot B))) \leq 1$$

con β de 0,3 a 0,8 en función del tipo de roca: 0,8: Areniscas compactas, caliza

El último grupo de teorías analizado, relaciona la carga de hundimiento con la σ_c (resistencia a compresión simple), la calidad y el tipo de la roca, el grado de empotramiento y la sobrecarga (profundidad) sobre el estrato rocoso:

Serrano y Olalla (1996 y 2002), proponen un método en el que realizan un análisis plástico, aplicando el método de las líneas características, suponiendo el medio como isótropo, homogéneo y sin peso propio, bajo el criterio de rotura de Hoek-Brown, empleando el esquema teórico de la forma de rotura de Meyerhof (1951) y el factor de forma propuesto por De Beer (1970).

Serrano (2010) resume el aporte en punta para roca caliza a través de diferentes normativas como se expresa en la figura 3.10.

RESISTENCIA ÚLTIMA POR PUNTA (MPa)												
GRADO METEORIZACIÓN	III				II				I			
EMPOTRAMIENTO	0Φ	1Φ	2Φ	3Φ	0Φ	1Φ	2Φ	3Φ	0Φ	1Φ	2Φ	3Φ
ROM 05-05	7,11	9,95	12,79	14,21	9,95	13,93	17,91	19,9	14,21	19,9	<u>25,58</u>	<u>28,43</u>
ROM 05-94	9	12,6	16,2	19,8	<u>22,5</u>	<u>31,5</u>	<u>40,5</u>	<u>49,5</u>	<u>54</u>	<u>75,6</u>	<u>97,2</u>	<u>118,8</u>
GCOC	10,61	14,85	19,09	19,09	<u>23</u>	<u>32,21</u>	<u>41,41</u>	<u>41,41</u>	<u>40,25</u>	<u>56,35</u>	<u>72,45</u>	<u>72,45</u>
CTE	12,52	17,53	22,54	27,55	33,70	47,18	60,66	74,14	58,92	82,49	106,06	129,63
JIMENEZ SALAS et al.	20	26,7	33,3	40	20	26,7	33,3	40	20	26,7	33,3	40
ASSTHO	12,22	12,22	12,22	12,22	33,52	33,52	33,52	33,52	69,11	69,11	69,11	69,11
AASTHO MODIFICADA	32,82	33,44	34,04	34,62	72,45	72,66	72,95	73,29	142,18	141,12	140,3	139,7
HONG-KONG	9	9	9	9	21	21	21	21	33,75	33,75	33,75	33,75
SERRANO OLALLA AJUSTADO	11,23	12,84	14,49	16,08	13,65	15,45	17,27	19,08	23,97	27,18	30,48	33,83
ZHANG	21,53	21,53	21,53	21,53	21,53	21,53	21,53	21,53	36,3	36,3	36,3	36,3

TABLA 7. Resistencia última por punta (σ_{tp}) en calizas.

Figura 3.10. Resistencia última por punta

A manera de resumen se puede plantear que el estudio del efecto de la penetración del pilote dentro de una roca con la presencia de estratos débiles es un tema objeto de estudio hoy en día el cual no tiene una respuesta definitiva.

Modelación del pilote. Calibración del modelo

Como se ha comentado anteriormente, el programa PLAXIS fue concebido inicialmente para el análisis de diques construidos sobre las capas de suelo blando que forman el subsuelo de Holanda. Actualmente, las aplicaciones de PLAXIS engloban la mayoría de los problemas de ingeniería geotécnica, tanto de mecánica de suelos como de mecánica de rocas.

El programa PLAXIS es recomendado para problemas de excavaciones subterráneas, análisis de la tensión y deformación del suelo sometido a grandes cargas drenadas y no drenadas, y problemas de flujo acoplado.

PLAXIS permite el estudio de una gran variedad de modelos constitutivos:

- Modelo de elasticidad
- Modelo de Mohr – Coulomb
- Modelo del endurecimiento isotrópico (Hardening-Soil)
- Modelo del deslizamiento del suelo blando
- Modelo del suelo blando

Aunque las aplicaciones del programa en problemas de geotecnia parecen estar totalmente resueltos, en realidad no es así, ya que el programa ha sido desarrollado partiendo de la filosofía inicial del estudio del subsuelo sometido a grandes cargas y a grandes excavaciones subterráneas, incluyendo en todos ellos el problema de flujo y ofreciendo la posibilidad del análisis mediante diferentes modelos de comportamiento del terreno. De todos modos, PLAXIS es un programa que almacena gran cantidad de opciones para el estudio de cualquier tipo de terreno y de geometría.

Para el problema que se aborda se propone modelar en PLAXIS tres casos donde se varíe el espesor de la roca bajo la punta del pilote y evaluar el efecto del mismo. Para ello se decidió modelar la roca como un suelo con Cohesión y Angulo de Fricción interna.

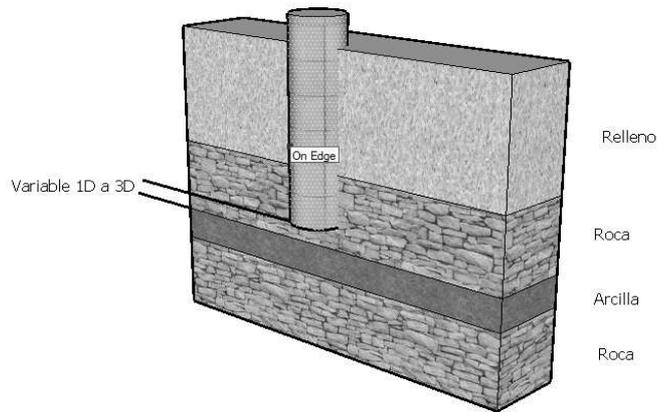


Figura 3.11. Esquema para la modelación

Tabla 3.1. Determinación de las propiedades de la Roca Caliza.

Tipo de Roca	$\Phi_b(^{\circ})$
Gres	25-35
Limolita	27-33
Conglomerado	35
Creta	30
Caliza	27-37
Basalto	31-38
Granito (grano fino)	29-35
Granito	31-35
Pórfido	31
Pizarra	27
Gneis	23-29
Esquisto	21-30

Tabla 3.2. Determinación de las propiedades de la Roca Caliza.

Description	Porosity (%)	S_r (MPa)	Φ	Range of Confining Pressure (Mpa)
Berea sandstone	18.2	27.2	27.8	0-200
Bartlesville sandstone		8	37.2	0-203
Pottsville sandstone	14	14.9	45.2	0-68.9
Repetto siltstone	5.6	34.7	32.1	0-200
Muddy shale	4.7	38.4	14.4	0-200
Stockton shle		0.34	22	0.8-4.1

Capítulo 3. Determinación de la capacidad de carga

Edmonton bentonitic shale (water content 30 %)	44	0.3	7.5	0.1-3.1
Sioux quartzite		70.6	48	0-203
Texas slate: loaded 30° to cleavage		26.2	21	34.5-276
90° to cleavage		70.3	26.9	34.5-276
Georgia marble	0.3	21.2	25.3	5.6-68.9
Wolf Camp limestone		23.6	34.8	0-203
Indiana limestone	19.4	6.72	42	0-9.6
Hasmark dolomite	3.5	22.8	35.5	0.8-5.9
Chalk	40	0	31.5	10-90
Blaine anhydrite		43.4	29.4	0-203
hada biotite granite	0.4	55.2	47.7	0.1-98
Stone Mountain granite	0.2	55.1	51	0-68.9
Nevada Test Site basalt	4.6	66.2	31	3.4-34.5
Schistose gneiss 90° to schistosity	0.5	46.9	28	0-69
30° to schistosity	1.9	14.8	27.6	0-69

Tabla 3.3. Valores típicos de parámetros de resistencia para rocas

Tipo de roca	Peso unitario Seco (kN/m ³)	Cohesión (Mpa)	Angulo de Fricción (°)
Rocas ígneas duras: granito y basalto	25-30	35-55	35-45
Rocas metamórficas: cuarcita, neiss, pizarras	25-28	20-40	30-40
Rocas sedimentarias duras: caliza, dolomita, arenisca	23-28	10-30	35-45
Rocas sedimentarias blandas: arenisca, lutitas, limolita	17-23	1-20	25-35

Como se puede resumir en la literatura consultada se propone que la caliza puede ser considerada como un suelo con cohesión de 10 a 30 Mpa y $\phi = 30$ y 40 grados

Con estos valores se procede a modelar con el PLAXIS y siguiendo las recomendaciones (mallado, condiciones de frontera y calibración del modelo) el pilote apoyado en un estrato de roca.

Tabla 3.4 Datos utilizados para el cálculo de la capacidad de carga

Elemento	Densidad (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ang. Fricción interno (Grados)	E (kPa)	Modelo
Releno	18	0	0	10000	Morh-Coulomb
Arcilla 1	19	100	0	25000	Morh-Coulomb
Roca Caliza	20	10	35	30000	Morh-Coulomb
Pilote	24			2.7e7	Lineal elástico

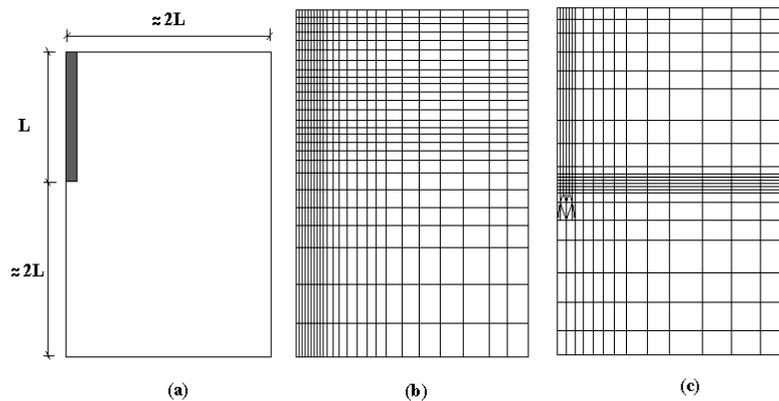


Figura 3.12. Malla de elementos finitos para pilotes

A continuación, se representa la secuencia de pasos en el corrido de cada modelo con el PLAXIS

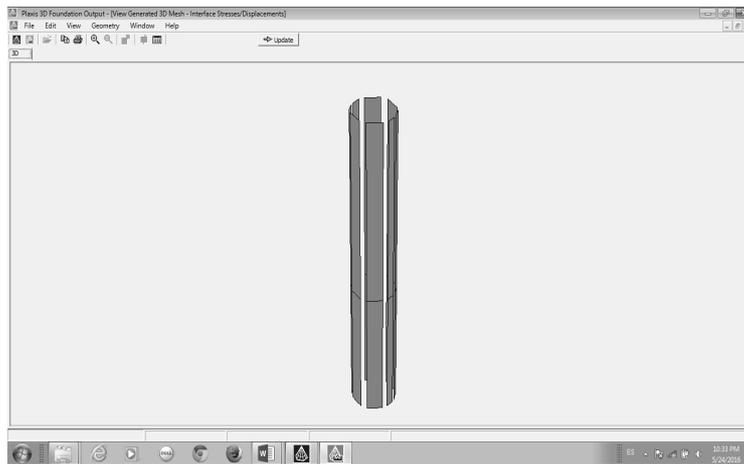


Figura 3.13. Modelación del Pilote

Capítulo 3. Determinación de la capacidad de carga

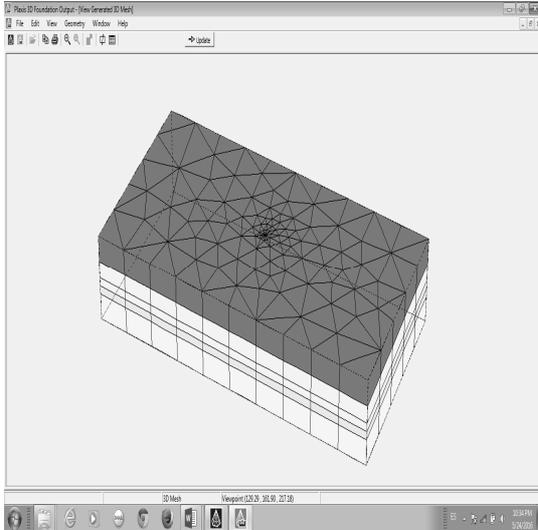


Figura 3.14. Perfil de suelo

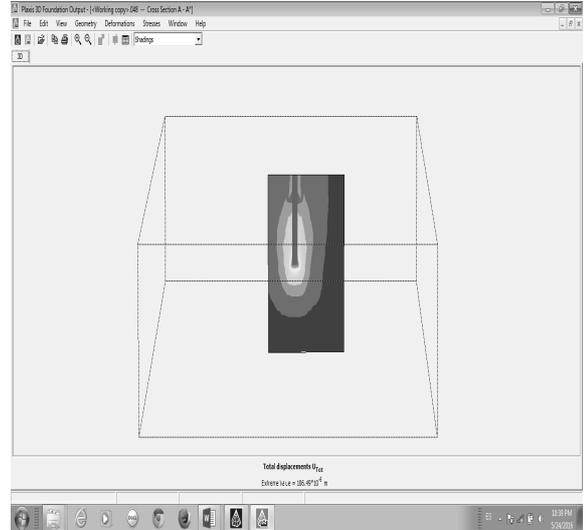


Figura 3.15 Estado tensional en la cara del pilote

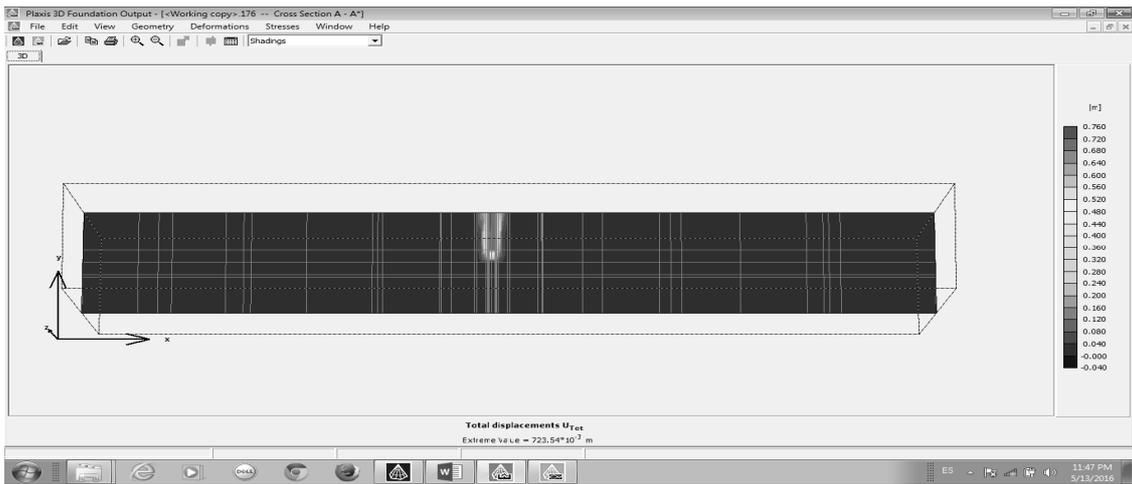


Figura 3.16 Deformaciones alrededor del pilote

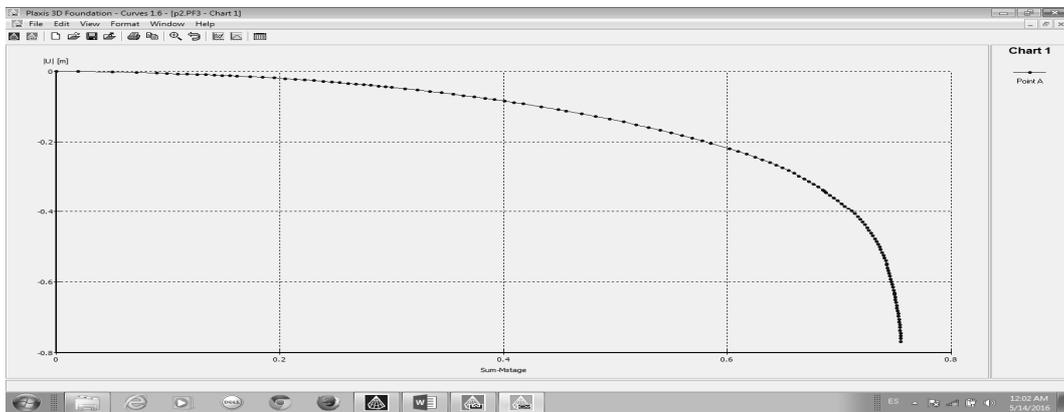


Figura 3.17 Curva carga deformación para un pilote con 3D bajo la punta del pilote

Capítulo 3. Determinación de la capacidad de carga

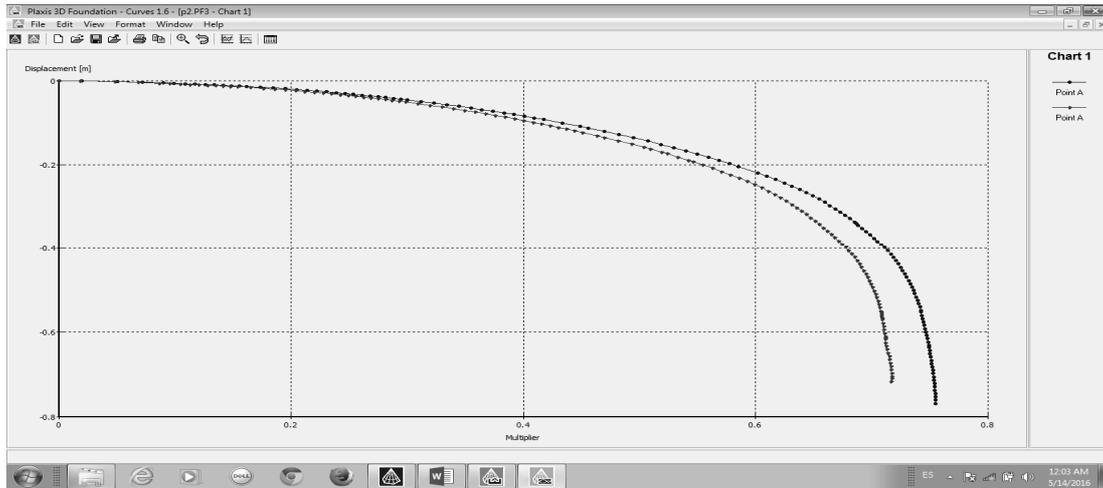


Figura 3.18 Curva carga deformación. Caso 1: Azul 3D bajo punta pilote. Caso 2: Rojo 2D bajo punta del pilote

Si se utiliza como criterio de falla el 10 % del diámetro de pilote (0.6 m) se puede apreciar que para el caso 1 (3D de roca baja la punta del pilote) la carga es superior que para el caso 2 (2D de roca baja la punta del pilote).

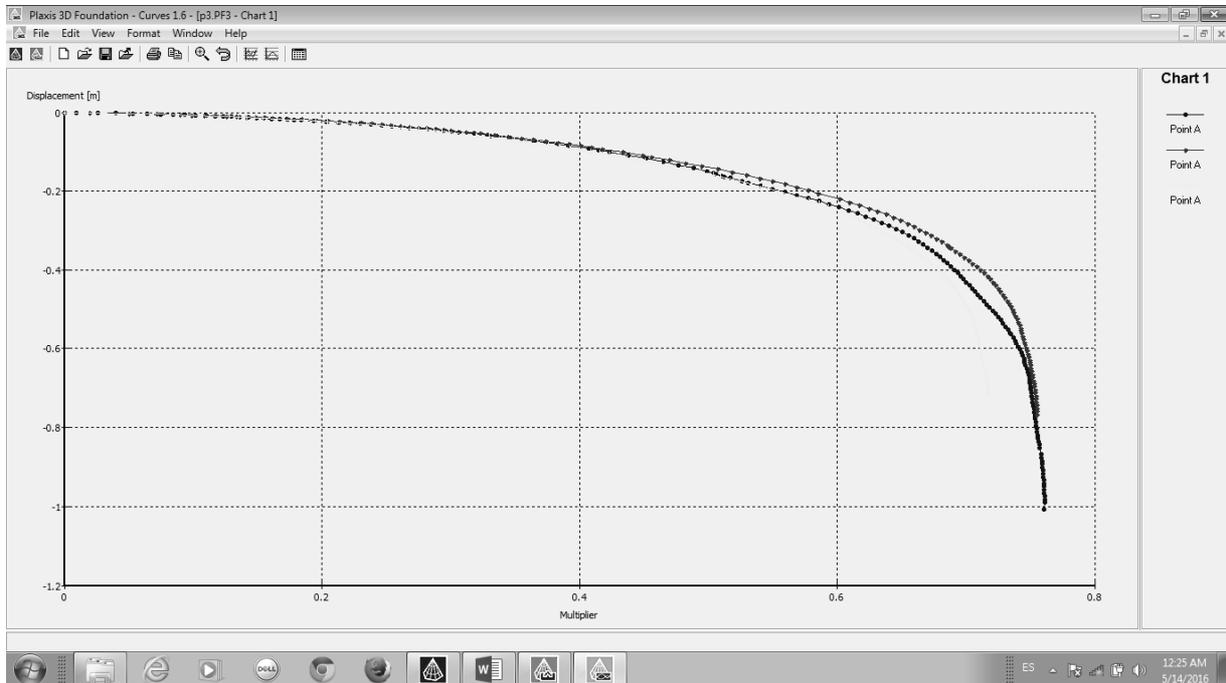


Figura 3.19 Curva carga deformación. Caso 1: Azul 3D bajo punta pilote. Caso 2: Amarillo 2D bajo punta del pilote. Caso 3: Amarillo 1D bajo la punta del pilote

De manera similar si se utiliza como criterio de falla el 10 % del diámetro de pilote (0.6 m) se puede apreciar que para el caso 1 (3D de roca baja la punta del pilote) la carga es superior que para el caso 2 (2D de roca baja la punta del pilote). Para los casos 2 y 3 la diferencia es insignificante, pudiéndose ratificar la propuesta de las diferentes normativas que establece que para espesores mayores a 3D se puede considerar el aporte en punta de los pilotes empotrados en roca.

Vale destacar que cálculos más refinados y que incluyeran la variación de otros parámetros, como diámetro y tipo de roca pudieran validar la hipótesis anterior. También el uso de programas con modelos más precisos del comportamiento de la roca serían de gran cuantía para verificar el comportamiento de pilotes empotrados en roca.

3.4 Análisis de los pilotes correspondientes a los puentes en estudio.

Estribo Izquierdo

Con los datos ofrecidos por las pruebas de integridad de pilotes realizadas a la cimentación sobre pilotes de los puentes 1 y 3 del pedraplén Jigüey, Cayo Romano, Cayo Cruz se calculó la capacidad de carga de dicha cimentación, se ha centrado solamente en el puente 1 debido a que la ENIA nacional solamente brindó datos para calcular este puente.

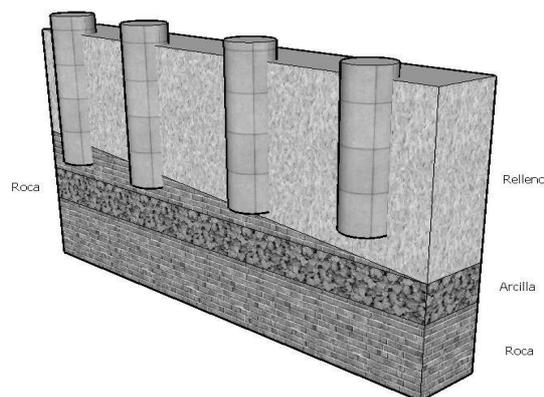


Figura 3.20. Estrado izquierdo (Pilotes del 1 al 6)

Los pilotes de 1 al 6 todos penetran en la roca más de 1D por lo que la capacidad de carga se calculó como aporte a fricción en la roca. (Martínez, 2010)

Se calculó por tres métodos diferentes la capacidad de carga de los pilotes (Torne (1977), Rowe & Armitage (1987) y Según la Norma Cubana 1988).

- Resistencia por fuste como función lineal de la resistencia a compresión simple.

Torne (1977) $\tau_{fuste} = 0.05(\rightarrow 0.1) \cdot \sigma_c$

Con $\alpha = 0.05$

- Resistencia por fuste como función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión simple

Rowe & Armitage (1987) $\tau_{fuste} = \alpha \cdot \sigma_c^{0.5}$ (τ_{fuste} y σ_c en MPa)

Con $\alpha = 0.5$

- Según la Norma Cubana

$\tau_{fuste} = \alpha \cdot \sigma_c^{0.5}$ (τ_{fuste} y σ_c en MPa)

Con $\alpha = 0.45$

Tabla 3.5 Cálculo de la capacidad de carga de los pilotes del 1 al 6

Pilote	Qf (Torne (1977)) (kN)	Qf (Row e & Armitage (1987)) (kN)	Qf (NC) (kN)
1	1509.1	112.5	101.2
2	1560	116.3	104.6
3	1780.4	132.7	119.4
4	2085.6	155.5	139.9
5	2272.1	169.4	152.4
6	1865.2	139	125.1
Total	11072.4	825.4	742.6

A este estribo también le pertenecen los pilotes 7 y 8 que no se calcularon por mostrar posibles defectos en las pruebas de integridad de pilotes.

Como puede apreciarse los valores propuestos por Torne (1977) son muy altos, siendo los más conservadores los propuestos por la Norma Cubana, los cuales no presentan diferencias significativas con Row e & Armitage (1987).

En la siguiente tabla se le añadirá el aporte a fricción del suelo arcilloso existente sobre el estrato de roca, considerando su posible aporte.

Tabla 3.6. Aporte total en el estribo izquierdo

Pilote	Qf (Roca) (kN)	Qf (Arcilla) (kN)	Q total (kN)
1	101.2	105.3	206.5
2	104.6	105.3	209.9
3	119.4	105.3	224.7
4	139.9	105.3	245.2
5	152.4	105.3	257.7
6	125.1	105.3	230.4
Total	742.6	631.8	1374.4

Como puede apreciarse este valor es más lógico que el obtenido anteriormente y se acerca al valor de capacidad de carga de un estribo.

En la Tabla 3.7 se le añadirá al aporte en punta del suelo arcilloso existente debajo del estrato de roca, considerando su posible aporte. En la bibliografía consultada se propone la siguiente solución para cimentaciones superficiales que adaptaremos a pilotes.

Como debajo de las puntas de estos pilotes no hay más de $3D$ se convertirá la roca según tabla 3.3 (valores típicos de parámetros de resistencia para rocas) en un suelo cohesivo de $C = 10000$ kPa y se obtendrá el valor del coeficiente N_c según (Juárez Badillo, 1967).

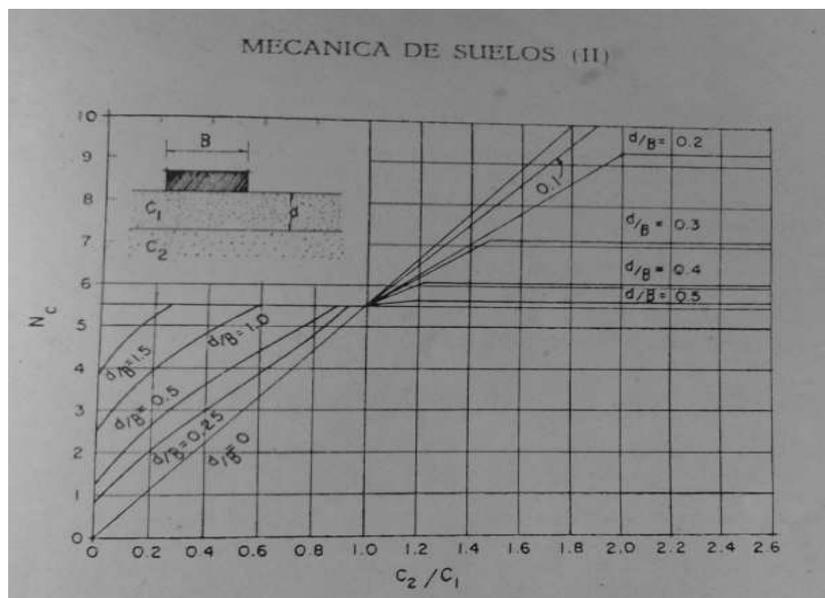


Figura 3.21. Solución de Juárez Badillo, 1967 para un sistema de dos estratos cohesivos

La relación $C_2/C_1 = 0.01$ y la relación d/B varía entre 0.1 y 0.85 por tanto los valores de N_c varían entre 0.5 y 2.1 aproximadamente.

➤ Según la norma cubana el aporte en punta en suelo cohesivo se calcula:

$$Q_p^* = \frac{A_p \cdot q_p^*}{\gamma_{gp}}$$

Donde N_c se obtuvo de la figura 3.21 dependiendo de ambas relaciones

Tabla 3.7. Aporte en el estribo izquierdo (kN)

Pilote	Longitud de empotramiento L_e en la roca (lente) (kN)	Espesor de roca bajo la punta(m) (kN)	Q_f en la roca (kN)	Q_f en la arcilla (kN)	Q_p según (Juárez Badillo, 1967) (kN)	Q_p (Arcilla homogénea) (kN)
1	0.89 m	0.51	101.2	105.3	78.8	196
2	0.92 m	0.48	104.6	105.3	75.04	196
3	1.05 m	0.35	119.4	105.3	71.3	196
4	1.23 m	0.17	139.9	105.3	41.3	196
5	1.34 m	0.06	152.4	105.3	18.8	196
6	1.10 m	0.30	125.1	105.3	45.1	196
Total			742.6	631.8	330.4	1176

Analizando estos resultados se propone considerar el aporte a fricción del pilote en roca y el aporte en punta tomando el suelo como una arcilla homogénea, pudiendo existir la reserva del aporte a fricción de la arcilla sobre la roca.

Tabla 3.8. Aporte total en el estribo izquierdo (kN)

Pilote	Longitud de empotramiento L_e en la roca (lente)	Espesor de roca bajo la punta(m)	Q_f en la roca	Q_p (Arcilla homogénea)	Q total
1	0.89 m	0.51	101.2	196	297.2
2	0.92 m	0.48	104.6	196	300.6
3	1.05 m	0.35	119.4	196	315.4
4	1.23 m	0.17	139.9	196	335.9
5	1.34 m	0.06	152.4	196	348.4
6	1.10 m	0.30	125.1	196	321.1
Total			742.6	1176	1918.6

Es importante destacar que los pilotes del 1 al 6 son los que más probabilidades tienen de que falle la roca bajo su punta. Teniendo en cuenta los pequeños espesores de la misma esta afirmación está en correspondencia con la hipótesis de no considerar el aporte en punta de la roca.

Estribo Derecho. Pilotes en roca

El estribo derecho presenta dos condiciones diferentes de la profundidad de los pilotes con respecto al suelo que los rodea por lo que se calculó de dos formas diferentes la capacidad de carga de esta cimentación.

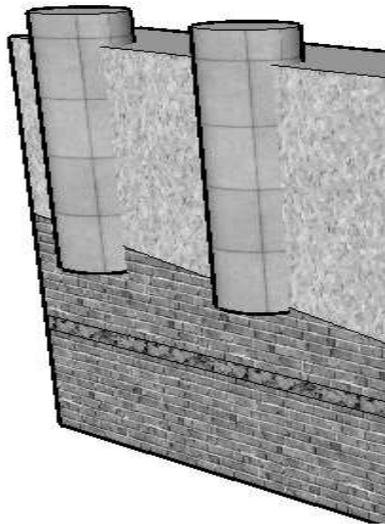


Figura 3.22. Estribo derecho (Pilotes del 10 y 11)

Como puede apreciarse del gráfico anterior los pilotes 10 y 11 no penetran más de 1D en la roca por lo que solo se calculó el aporte a fricción en el suelo y el aporte en punta en la roca.

- Según la norma cubana el aporte en punta en la roca:

$$Q_{V}^{*} = R^{*} \cdot A_{p} \text{ (kN)}$$

- Según la norma cubana el aporte a fricción en el suelo cohesivo:

$$Q_{f}^{*} = \frac{P_{p} \sum_{i=1}^{i=n} f_{i}^{*} L_{i}}{\gamma_{gf}}$$

Tabla 3.9 Cálculo de la capacidad de carga de los pilotes 10 y 11

Pilote	Profundidad dentro de la roca (m)	Qp (NC) (kN)	Qf (NC) (kN)
10	0.4	399	308.7
11	0.5	420	308.7
Total		819	617.4

Como el aporte en punta en la roca es mayor que el aporte a fricción del suelo solo se tomó el aporte en punta, aunque no penetre más de 1D dentro de este estrato rocoso.

Estribo Derecho. Pilotes en suelo

Los pilotes 12, 13 y 16 no llegan al estrato rocoso por lo que se calculó la capacidad de carga como aporte a fricción y aporte en punta en suelos cohesivos, obteniendo una capacidad de carga igual a la suma de ambos resultados.

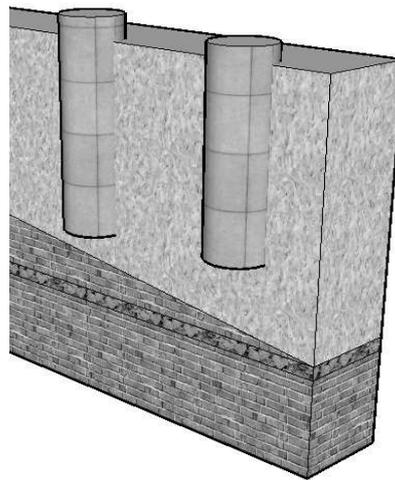


Figura 3.23. Estribo derecho (Pilotes del 12, 13 y 16)

- Según la norma cubana el aporte a fricción en el suelo cohesivo:

$$Q_f^* = \frac{P_p \sum_{i=1}^{i=n} f_i^* L_i}{\gamma_{gf}}$$

➤ Según la norma cubana el aporte en punta en suelo cohesivo:

$$Q_p^* = \frac{A_p \cdot q_p^*}{\gamma_{gp}}$$

Tabla 3.10 Cálculo de la capacidad de carga de los pilotes 12, 13 y 16

Pilote	Profundidad dentro de la arcilla (m) (kN)	Qp (NC) (kN)	Qf (NC) (kN)	Q total (kN)
12	4.9	107.7	219.5	327.2
13	4.3	107.7	192.4	300.1
16	3.9	107.7	174.5	282.2
Total		323.1	586.4	1495.9

A manera de comprobación se calcula la capacidad de carga de estos pilotes apoyados en suelo con el Software GeoFine, comprobándose que la capacidad de carga es de 331 kN (Qf = 229 kN y Qp = 102 kN) para un pilote. Se decide comprobar los resultados con este software por su facilidad de ejecución y ajustarse a los datos que se posee para la modelación del problema.

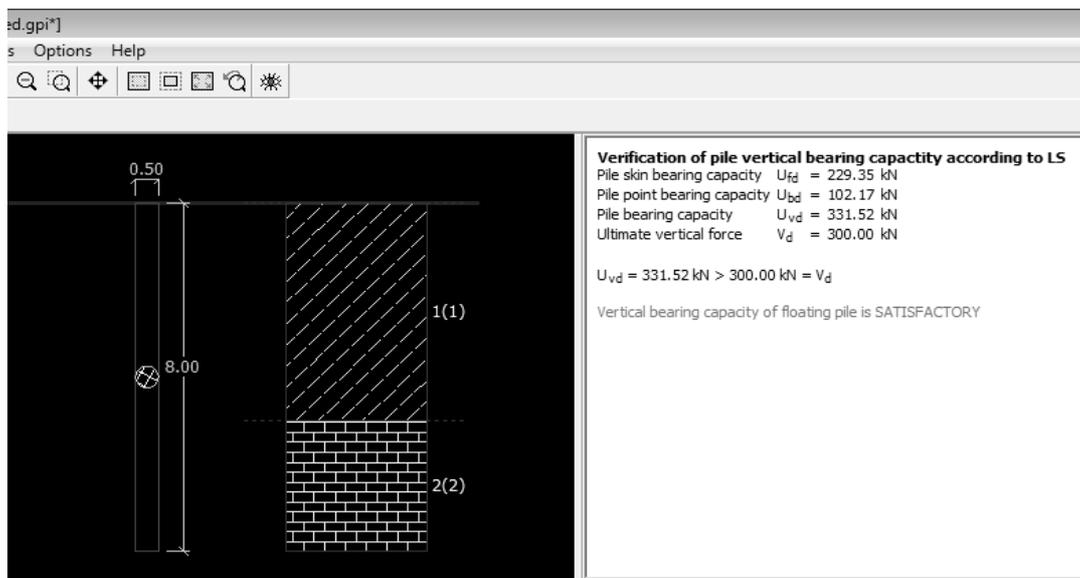


Figura 3.24 Resultados software GeoFine

A este estribo también le pertenecen los pilotes 9, 14 y 15 que no se calcularon por mostrar posibles defectos en las pruebas de integridad de pilotes.

3.5 Modelación de capacidad de carga de pilotes en suelo

Con el objetivo de comprobar los resultados obtenidos para el caso de pilotes en suelos, se realiza la modelación por el programa PLAXIS del pilote aislado. A continuación, aparecen las principales pantallas con los datos y los resultados obtenidos.

Paso 1: Generación de la malla de elementos finitos: Se define las condiciones de frontera y los límites laterales e inferiores. El software genera automáticamente los elementos de la malla.

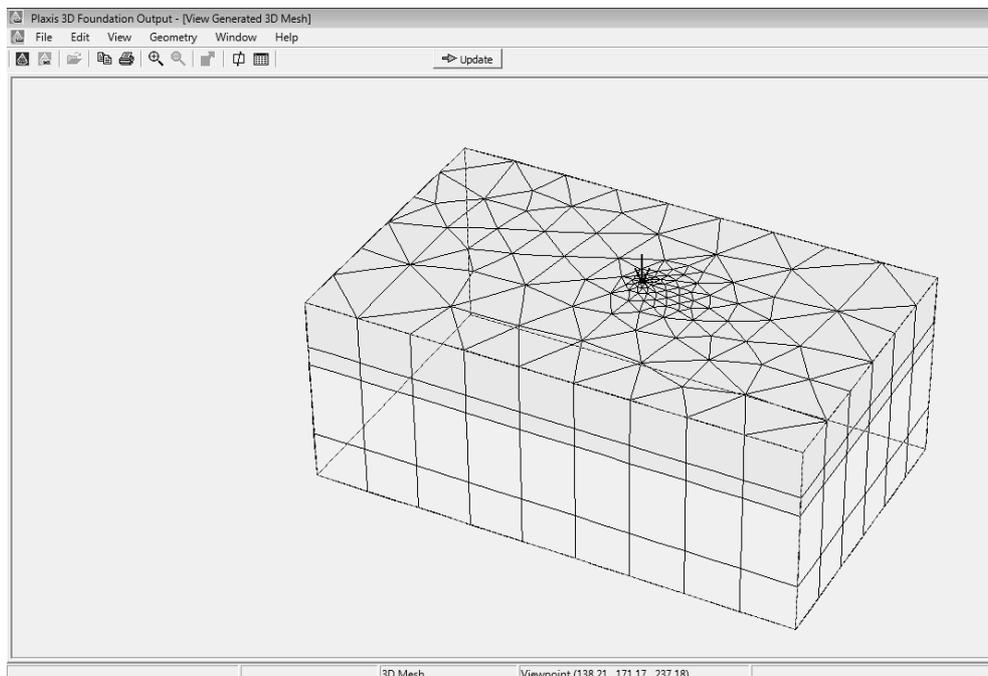
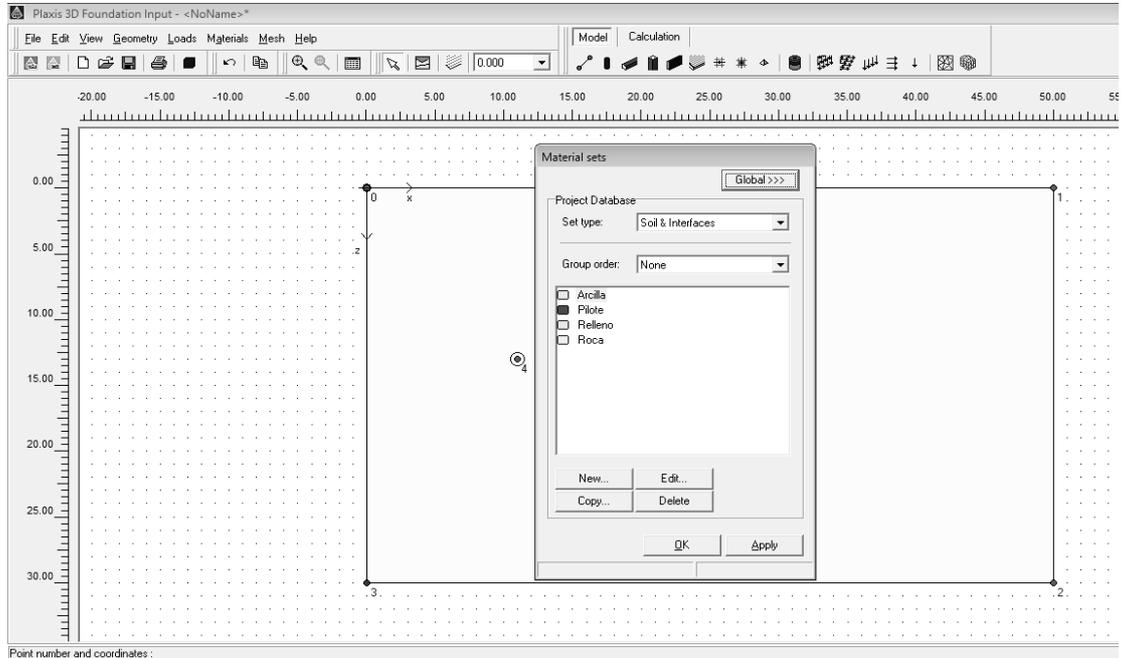


Figura 3.25. Malla de elementos finitos

Paso 2: Definición de las propiedades de los elementos que componen el sistema (Relleno, arcilla, roca y pilote)



Point number and coordinates:

Figura 3.26. Materiales utilizados para modelar el suelo y el pilote

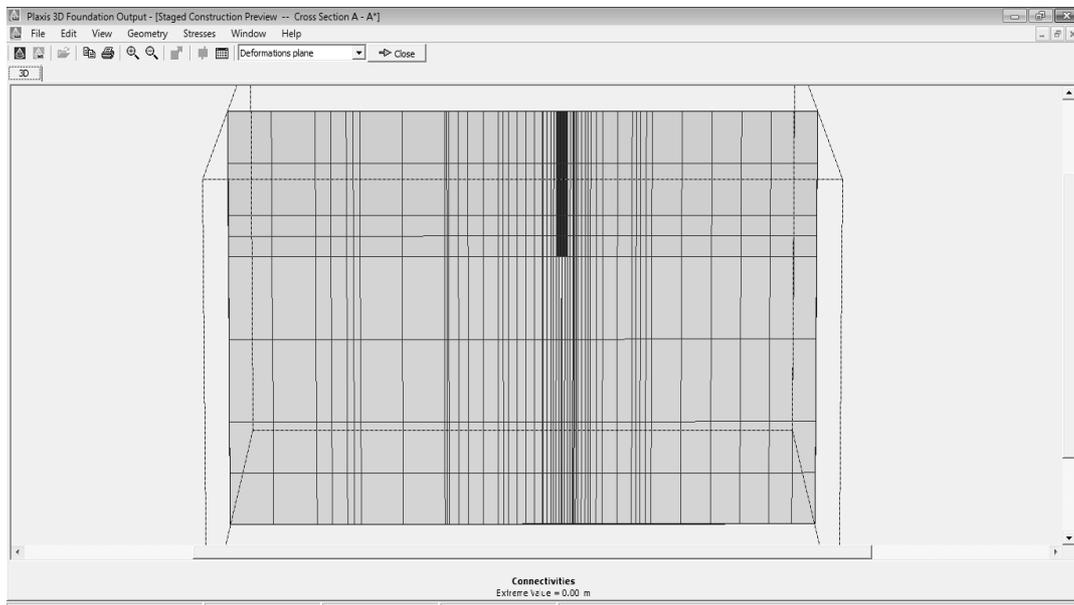


Figura 3.27. Corte donde se parecía el pilote en la masa de suelo

Paso 3: Definición de la carga (valor y posición)

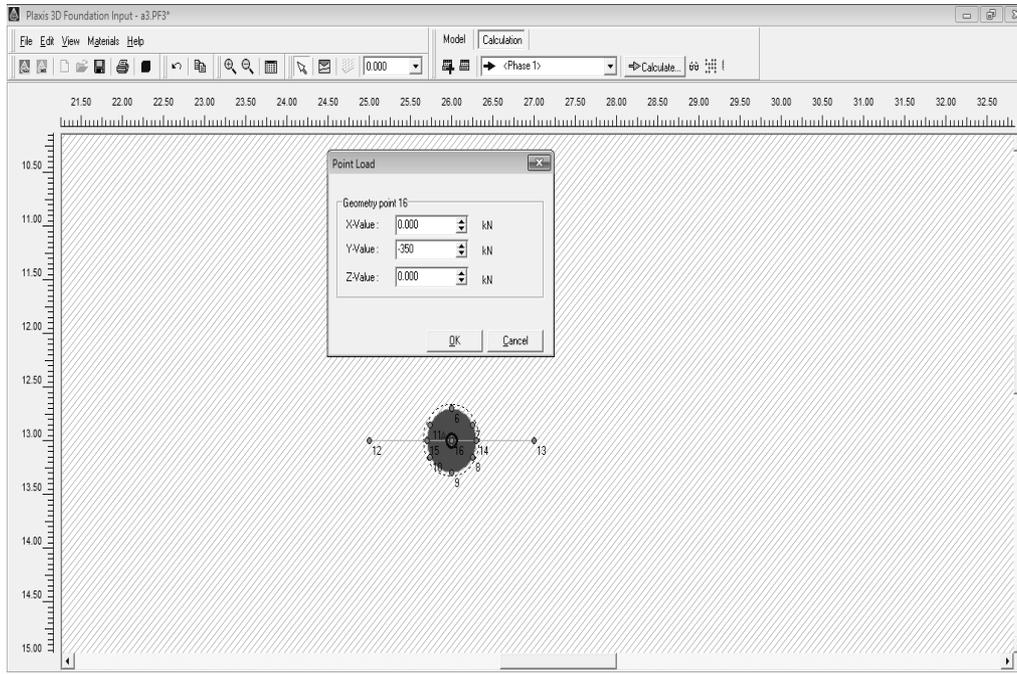


Figura 3.28. Carga aplicada al pilote

Paso 3: Definición del punto a monitorear en la curva carga deformación

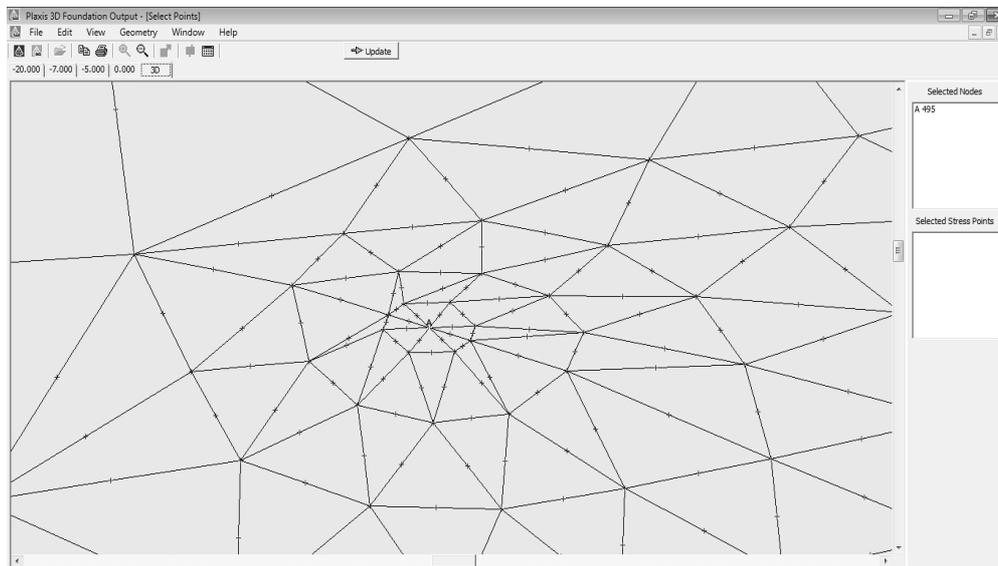


Figura 3.29. Definición del punto de control Carga vs deformación

Paso 6: Corrida del programa y obtención de la curva carga deformación

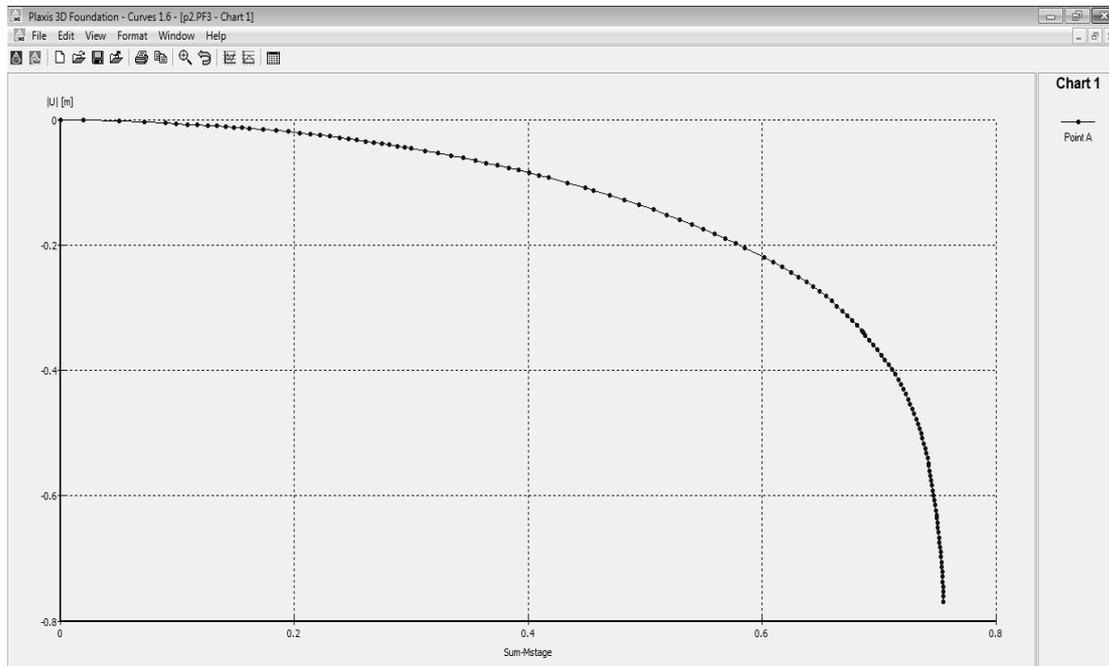


Figura 3.30 Curva carga deformación para una carga de 350 kN

Tabla 3.11. Cálculo de la capacidad de carga de los pilotes 12, 13 y 16 según NC vs PLAXIS

Pilote	Profundidad dentro de la arcilla (m)	Propuesta de Norma			Plaxis
		Qp (kN)	Qf (kN)	Q total (kN)	Q total (kN)
12	4.9	107.7	219.5	327.2	359.2
13	4.3	107.7	192.4	300.1	320.3
16	3.9	107.7	174.5	282.2	308.1
Total		323.1	586.4	909.6	987.6

Como puede apreciarse la diferencia entre la propuesta de norma y el software Plaxis es menor al 10 %, lo que valida los resultados obtenidos para el caso de pilotes en suelos cohesivos.

3.6 Resultados finales.

Capítulo 3. Determinación de la capacidad de carga

Una vez realizados los cálculos por expresiones clásicas y la modelación matemática se resumen en la siguiente tabla los resultados finales:

Tabla 3.12. Resultados finales de esta etapa de la investigación

Estribo Izquierdo						
Plote	Roca		Arcilla		Qt(kN)	Observaciones
	Qp (kN)	Qf (kN)	Qp (kN)	Qf (kN)		
1	-	101.2	196	-	297.2	Trabaja a fricción / Punta
2	-	104.6	196	-	300.6	Trabaja a fricción / Punta
3	-	119.4	196	-	315.4	Trabaja a fricción / Punta
4	-	139.9	196	-	335.9	Trabaja a fricción / Punta
5	-	152.4	196	-	348.4	Trabaja a fricción / Punta
6	-	125.1	196	-	321.1	Trabaja a fricción / Punta
7	-	-	-	-	-	Plotes con defecto
8	-	-	-	-	-	Plotes con defecto
Total	0	742.6	1176	0	1918.6	

Estribo Derecho						
9	-	-	-	-	-	Plotes con defecto
10	399	-	-	-	399	Trabaja en punta (Roca)
11	420	-	-	-	420	Trabaja en punta (Roca)
12	-	-	107.7	219.5	327.2	Plote en suelo
13	-	-	107.7	192.4	300.1	Plote en suelo
14	-	-	-	-	-	Plotes con defecto
15	-	-	-	-	-	Plotes con defecto
16	-	-	107.7	174.5	282.2	Plote en suelo
Total	819	0	323.1	586.4	1728.5	

Como se observa los valores de capacidad de carga total de ambos estribos garantizan el posible funcionamiento del puente.

3.5 Conclusiones parciales

Una vez realizado el cálculo de la capacidad de carga de los pilotes en los estribos del puente No1 del pedraplén Jigüey, Cayo Romano, Cayo Cruz se establecen las siguientes conclusiones parciales:

1. La capacidad de carga del estribo izquierdo es de 1918.6 y el derecho 1728.5, lo que garantiza la construcción del puente.
2. La propuesta de Button, para el caso de suelos estratificados, parece válida para pilotes en el caso de pilotes que penetran roca que descansa sobre un suelo.
3. Por la complejidad del perfil de suelo del lugar, a pesar de determinar la capacidad de carga de los pilotes se recomienda la realización de ensayos de carga a escala real que demuestren la validez de las hipótesis utilizadas en el trabajo.

Conclusiones y Recomendaciones.

Conclusiones.

En este trabajo han sido investigados los temas relacionados con el cálculo de la capacidad de carga de pilotes en suelo y roca, combinando el empleo de las PIT para determinar la longitud real del elemento. A continuación, se hace énfasis en aquellas conclusiones, que contienen el aporte más significativo de este trabajo al tema objeto de estudio:

1. Las PIT son una importante herramienta para determinar la longitud real de pilotes fundidos in situ.
2. Los informes de los puentes de Cayo Cruz, Camagüey evidencian la no continuidad en longitud de varios pilotes.
3. La capacidad de carga del estribo izquierdo es de 1918.6 y el derecho 1728.5, lo que garantiza la construcción del puente.
4. Por la complejidad del perfil de suelo del lugar, a pesar de determinar la capacidad de carga de los pilotes se recomienda la realización de ensayos de carga a escala real que demuestren la validez de las hipótesis utilizadas en el trabajo.

Recomendaciones.

No obstante, los resultados obtenidos en esta investigación, todavía quedan muchos aspectos del análisis y diseño de cimentaciones sobre pilotes que deben ser trabajados con mayor profundidad. Como recomendaciones y futuras líneas de investigación que continúen la presentada en este trabajo se pueden destacar las siguientes:

1. Realizar la modelación para el fallo de pilotes en roca con espesores menores a tres diámetros (3D) bajo la punta del pilote
2. Realizar la modelación de cimentaciones sobre pilotes cuando existen coincidencia de estratos de suelo y roca o roca y suelo.

Bibliografía.

Bibliografía

1. Aoki, N.; Cintra, J.C.A. (1997): New Interpretations of the Dynamic Loading Curves for Driven Piles Based on the Energy Approach. Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics. p. 467-472. Rotterdam, Balkema.
2. Armitage, R. a., 1987. Estudio teórico de pilotes en roca. Australia: Conferencia internacional de mecanica de suelos.
3. ASTM C 876-91 (Reapproved 99). Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.
4. ASTM D5882. Método de ensayo Estándar para ensayos de integridad de impacto de baja deformación en cimentaciones profundas.
5. Badillo, J., 1967. *Mecanica de suelos. Tomo II*. s.l.:s.n.
6. Balech, J. (2000): Análisis de la transferencia de carga de pilotes hincados en arcillas a partir de pruebas de carga dinámica de energía creciente. São Carlos. 152 p. Escuela de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
7. Beel, D., 1970. Ensayo de carga de cimentación sobre pilotes. s.l.:Revista Ingeniería Civil 80.
8. BEIM Jorge. Et al. Standardization and Codification of Dynamic Pile Testing. A Worldwide Review. DFI 98 Conference.
9. Bustamente, M. and Gianeselli (1982): Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer. Proc. ESOPT II, Amsterdam, Vol, 2. P 493-500.
10. Caballero, C. R., Evaluación Numérico Experimental del Comportamiento bajo Carga Axial de Pilotes. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2007.
11. Caballeros, C. R. F., 2003. Generalidades sobre el estudio del diseño de pilotes, ensayos de integridad estructural y avances tecnológicos. Guatemala: s.n.
12. Caquot, A and Kerisel, J. (1964): Tratado de Mecánica de Suelos. 1ed en Castellanos. Gaunthier-Villars, Paris, France.
13. CONECTECT. GEOCISA. Manual de Evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura. Geotecnia y Cimientos S.A. Instituto Eduardo Torroja.
14. Cunha, R.P. and Sales, MM. (1998): Field Load Tests of Piled Footings Founded on a Tropical Porous Clay. Proc. 3rd Inter. Geot. Seminar Deep Foundation on Bored and Auger Piles. Ghent p. 433-438.

15. Das, Braja M. (1999): Principios de ingeniería de Cimentaciones. Braja M. Das. Editorial Thomson. México. 4ta edición. 855 pág.
16. DURAR. Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión de estructuras de hormigón armado.
17. Fellenius, Bengt H (2001) Axial loading test on bored piles and pile in groups. Artículo de internet.
 - a. García, D. G., 2010. Estudio sobre ensayos de integridad estructural de pilotes: metodos y ejemplos de interpretación de resultados. Catalunya: s.n.
18. HUSSEIN. Mohamad H. A Brief History of the Application of Stress-Wave Theory to Piles. ASCE license copyright [en línea] 2004.
19. Ibañez M., L (2002): Análisis del comportamiento geotécnico de las cimentaciones sobre pilotes sometidas a carga axial mediante la modelación matemática.
20. Ibañez M., L. (2000); Algunas recomendaciones para la modelación de problemas tensión deformación en cimentaciones sobre pilotes. Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño Estructural # 1626
21. Ibañez Mora, L (2001): Modelación matemática de las cimentaciones sobre Pilotes. Aplicaciones. ISPJAE. Cuba. Tesis de Doctorado. 98 p.
22. Informes emitidos por la ENIA Nacional
23. Jiménez S., J. A. (1986): Geotecnia y Cimientos. Editorial Rueda. Madrid. Tomos II y III.
24. Jiménez S., J. A. (1994): Curso sobre pilotajes y cimentaciones especiales. CEDEX. Madrid. Tomo I y II.
25. Juárez B., E.; Rico R., A. (1969): Mecánica de suelo. Edición Revolucionaria, La Habana. 1969. Tomo I y II.
26. L' Herminier, R. (1968): Mecánica de suelos y dimensionamiento de firmes. Versión al español de José Luis Ortiz. Madrid. Editorial Blume, 208 p.
27. Lambe, T. W. (1991): Mecánica de suelos. Editorial Limusa. México.
28. LIKINS. G. Recent Advances and proper use of PDI low strain pile integrity testing. En: Application of Stress-Wave Theory to Piles. Niyama & Beim. 2000 Balkema, Rotterdam
29. Martínez, E C., 2010. Estudio de la capacidad portante de los pilotes de la Marina Gaviota en Varadero. Varadero: s.n.
30. Menzanbach, E. (1968a): La capacidad de carga de pilotes y grupos de pilotes. La Habana. CITC. Universidad de la Habana. 78 p.

31. Mesat, P. (1993a): Combinaciones de elementos finitos para las obras geotecnicas. Consejos y recomendaciones. Francia. Boletín de laboratorio de mecánica de suelo # 212 (Julio- Agosto), p. 39-64
32. Mesat, P. (1993b): Modelos de elementos finitos y problemas de convergencia en el comportamiento no lineal. Francia. Boletín de laboratorio de mecánica de sueb # 214 (Nov-Dic), p. 34-56
33. Olalla, 2002. Carga de undimiento por punta de pilotes en roca: Estudio Corporativo. s.l.:Revista Ingenieria Civil 160, 34 pág.
34. Palacios, R. F. U., 2004. Guía para el diseño de pilotes. Piura: s.n.
35. Poubs, H. G. and Davis, E.H. (1980): Pile foundation analysis and design. Chichester: Wiley.
36. Propuesta de norma cubana de cimentaciones sobre pilotes (1988).
37. RAUSCHE. F. Pile Integrity testing and analysis. En: Application of Stress-Wave Theory to Piles. F.B.J Barends. 1992 Balkema, Rotterdam.
38. RC 9002. Especificaciones para la realización de los estudios complementarios para la estimación de la resistencia a compresión de los hormigones en las estructuras.
39. Reese, L.C. (1984) Handbook on Design of piles and Drilled Shafts Under Lateral Loads. US Department of Transp., Washington, DC, USA
40. Sales M.M. (1998a): El uso del método de las diferencias finitas en al análisis de pilotes cargados lateralmente. Procceding XI Congreso Brasileño de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotecnica, 245-252.
41. Sales, M.M. (2000a): Análise de Sapatas Estaqueadas. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.
42. Sales, M.M. y Cunha R. (1998b): Importancia del dominio en el análisis numérico de asentamiento de pilotes aislados. Procceding XI Congreso Brasileño de Mecánica de Suebs e Ingeniería Geotecnica, p 237-244
43. Sales, M.M., Cunha, R.P. e Farias, M.M. (2000a): Uso de método numérico na análise de sapatas estaqueadas. Submetido à publicação no IV Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia-SEFE IV, São Paulo
44. Serrano, 2012. Carga de undimiento por puente de pilotes en roca: Estudio corporativo. s.l.:Revista Ingenieria Civil 160 .
45. Sowers, G y Sowers F. (1977): Introducción a la mecánica de suelo y cimentaciones. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 677 p.

46. Thome, 1977. Capacidad de carga de pilote en suelos arenosos. Sidney (Australia): Simposio internacional de geotecnia Australia.
47. Tomlison, 1980. Deep foundations desing. s.l.:CEng, FICE. ISBN 072101013x.
48. Vega, Vélez. M (2005) Evaluación de métodos dinámicos para predecir capacidad de carga de fundaciones profundas. Artículo de Internet.

Bibliografía consultada en Internet.

- <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/rt/printerFriendly/1740/11578>
- <http://www.alipso.com/monografias4/correlaciones-capacidad-carga-pilotes/>
- <http://www.ilustrados.com/tema/8388/Aplicacion-modelazacion-matematica-realizacion-pruebas-carga.html>
- <http://www.redalyc.org/html/373/37303208/>
- <http://docplayer.es/8938422-Diseno-de-cimentaciones-sobre-pilotes-estado-del-arte.html>
- <http://www.ilustrados.com/documentos/eb-Aplicacion%20Modelacion%20Puertos%20en%20Cuba.pdf>