

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE CIVIL

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

**“APLICACIÓN DEL MÉTODO SÓNICO CON LA UTILIZACIÓN DEL
EQUIPO PILE ECHO TESTER PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL FACTOR
DE SEGURIDAD DE PILOTES. CASO DE ESTUDIO: PILOTES PUENTE
PEATONAL MUISNE.”**

AUTOR

JOSUE ROLANDO ZUMBA AGUIRRE

DIRECTOR: ING. WILSON CANDO

QUITO, 2017

DEDICATORIA

A mis padres y a mi hermano, les dedico cada una de estas páginas que contienen todas las alegrías y experiencias que he cosechado durante mi tiempo universitario, y me han permitido estar más preparado para un mundo que requiere cada vez más de profesionales comprometidos con su Patria y al servicio de sus ciudadanos.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios porque él es el motor y guía de mi camino, sin la fortaleza que me da cada día no hubiera sido posible alcanzar esta meta tan importante en mi vida.

También un profundo agradecimiento a mis padres y a mi hermano, quienes siempre han sido mi sustento y me dan ese aliento cada mañana para ser mejor como persona y como miembro de nuestra sociedad.

Y como no olvidar a cada uno de mis profesores que a través de este peregrinar por las aulas de mi querida Universidad han sabido prepararme tanto intelectualmente como emocionalmente, para aceptar cada uno de los retos y desafíos que me permitan lograr el desarrollo no solo personal, sino también de mi querido Ecuador.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Resumen.....	XII
Abstract.....	XIII
Capítulo I	
1. Generalidades.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Antecedentes.....	3
1.4.1. Descripción general del proyecto.....	3
1.4.2. Características generales del proyecto.....	5
1.4.2.1. Infraestructura.....	5
1.4.2.2. Superestructura.....	10
1.4.2.3. Apoyos antisísmicos tipo POT.....	10
1.4.2.3.1. Instalación de apoyos tipo POT.....	14
1.4.2.4. Obras misceláneas.....	16
1.5. Geomorfología y geología del sector.....	17
1.6. Estudio del suelo del sitio de implantación.....	21
Capítulo II	
2. Desarrollo del trabajo.....	24
2.1. Pilotes.....	24
2.1.1. Pilotes de hormigón armado.....	25
2.1.1.1. Pilotes de hormigón armado sin desplazamiento.....	26
2.1.1.1.1. Ejecución.....	27
2.1.2. Anomalías, fallos y defectos en los pilotes.....	30
2.1.3. Normativa sobre pilotes.....	35
2.1.3.1. Normativa ACI sobre pilotes.....	35
2.1.3.2. Normativa NEC-2015 sobre pilotes.....	37

2.2. Método sónico.....	38
2.2.1. Instrumentación.....	40
2.2.2. Ejecución del ensayo.....	41
2.2.3. Principio del método sónico.....	47
2.2.4. Interpretación de resultados.....	52
2.3. Factores de seguridad.....	62
2.3.1. Normativa NEC-2015 sobre factores de seguridad en pilotos.....	63
2.3.2. Normativas internacionales sobre factores de seguridad en pilotos.....	66
Capítulo III	
3. Desarrollo de la investigación.....	67
3.1. Metodología.....	67
3.2. Resultados.....	71
Capítulo IV	
4. Conclusiones y recomendaciones.....	91
Bibliografía.....	94
Anexos.....	95

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Capítulo I

Gráfico 1-1 Ubicación de Muisne.....	4
Gráfico 1-2 Elevación Puente peatonal de Muisne.....	6
Gráfico 1-3 Detalle frontal de pilas centrales.....	7
Gráfico 1-4 Detalle lateral de pilas centrales.....	8
Gráfico 1-5 Detalle de armadura de los pilotes.....	9
Gráfico 1-6 Sección longitudinal del puente.....	10
Gráfico 1-7 Sección transversal intermedia del puente.....	10
Gráfico 1-8 Apoyo tipo POT.....	11
Gráfico 1-9 Detalle de apoyos tipo POT-PM sobre el estribo del puente.....	11
Gráfico 1-10 Apoyo multidireccional tipo PM.....	12
Gráfico 1-11 Apoyo fijo tipo PF.....	13
Gráfico 1-12 Apoyo fijo tipo PF en pila del Puente peatonal de Muisne.....	13
Gráfico 1-13 Apoyo móvil tipo PM del Puente peatonal de Muisne.....	14
Gráfico 1-14 Disposición de conductos para colocación de pernos del apoyo.....	14
Gráfico 1-15 Nivelación del apoyo.....	15
Gráfico 1-16 Retiro de bloqueos temporales del apoyo.....	15
Gráfico 1-17 Modelo del Puente peatonal de Muisne.....	15
Gráfico 1-18 Modelo de un estribo con defectos en sus pilotes.....	16
Gráfico 1-19 Sección transversal en pilas del puente.....	16
Gráfico 1-20 Identificación geológica del cantón Muisne.....	17
Gráfico 1-21 Zonas sísmicas del Ecuador.....	18
Gráfico 1-22 Carta de inundación de Muisne por tsunami.....	20

Gráfico 1-23 Zonas de amenazas por movimientos en masa del cantón Muisne.....	21
Gráfico 1-24 Ubicación de sitios de perforación.....	23
Capítulo II	
Gráfico 2-1 Tipos de armaduras de pilotes de hormigón.....	26
Gráfico 2-2 Diagrama esquemático de perforación con cuchara rotatoria.....	28
Gráfico 2-3 Diagrama esquemático de perforación con cuchara de almeja.....	28
Gráfico 2-4 Diagrama esquemático de perforación con barrena continua.....	29
Gráfico 2-5 Pilotes perforados con camisa pérdida.....	30
Gráfico 2-6 Defecto de rotura o corte en un pilote.....	31
Gráfico 2-7 Defecto de ensanchamiento en un pilote	32
Gráfico 2-8 Defecto debido a una incorrecta extracción de la camisa.....	33
Gráfico 2-9 Defecto en un pilote construido con camisa recuperable.....	34
Gráfico 2-10 Deficiencias en la condición del hormigón.....	35
Gráfico 2-11 Sistema de cimentación profunda con pilotes y cabezales.....	36
Gráfico 2-12 Mecanismos de interacción sísmica suelo-pilote.....	37
Gráfico 2-13 Esquema general de la técnica de Eco.....	40
Gráfico 2-14 Descabezado de pilote en Puente peatonal de Muisne.....	41
Gráfico 2-15 Preparación de la cabeza del pilote.....	43
Gráfico 2-16 Velocidad de la onda en un cilindro de hormigón en función de su edad y su resistencia a la compresión.....	44
Gráfico 2-17 Ejecución del ensayo de Eco.....	44
Gráfico 2-18 Gráfico de velocidad de un pilote sano.....	46
Gráfico 2-19 Gráfico de velocidad de un pilote con anomalía.....	46
Gráfico 2-20 Curva teórica para un pilote sano.....	48

Gráfico 2-21 Curva teórica para un pilote con estrechamiento.....	49
Gráfico 2-22 Gráfico de atenuación según Briard.....	50
Gráfico 2-23 Curvas reales de Eco en suelos con distinta rigidez.....	51
Gráfico 2-24 Curva de eco teórica para pilote con reducción de sección.....	53
Gráfico 2-25 Curva de eco teórica para pilote con aumento de sección.....	53
Gráfico 2-26 Comportamiento de ondas de pilote continuo con punta libre.....	54
Gráfico 2-27 Curva de eco teórica de pilote en condiciones de punta libre.....	55
Gráfico 2-28 Curva real de eco de un pilote en condiciones de punta libre.....	56
Gráfico 2-29 Curva teórica de pilote en condiciones de punta con empotramiento.....	56
Gráfico 2-30 Comportamiento de ondas en pilote continuo con empotramiento en roca o suelo duro.....	57
Gráfico 2-31 Curva real de pilote en condiciones de punta con empotramiento.....	58
Gráfico 2-32 Curva de Eco tipo 0.....	58
Gráfico 2-33 Curva de Eco tipo 1.....	59
Gráfico 2-34 Curva de Eco tipo 2.....	59
Gráfico 2-35 Grupo de pilotes.....	65
 Capítulo III	
Gráfico 3-1 Identificación de pilas y estribos.....	71
Gráfico 3-2 Identificación de los pilotes del encepado.....	71
Gráfico 3-3 Reflectograma del pilote 1 del estribo 1.....	71
Gráfico 3-4 Reflectograma del pilote 2 del estribo 1.....	72
Gráfico 3-5 Reflectograma del pilote 3 del estribo 1.....	72
Gráfico 3-6 Reflectograma del pilote 4 del estribo 1.....	73
Gráfico 3-7 Reflectograma del pilote 1 de la pila 1.....	73

Gráfico 3-8 Reflectograma del pilote 2 de la pila 1.....	74
Gráfico 3-9 Reflectograma del pilote 3 de la pila 1.....	74
Gráfico 3-10 Reflectograma del pilote 4 de la pila 1.....	75
Gráfico 3-11 Reflectograma del pilote 1 de la pila 2.....	75
Gráfico 3-12 Reflectograma del pilote 2 de la pila 2.....	76
Gráfico 3-13 Reflectograma del pilote 3 de la pila 2.....	76
Gráfico 3-14 Reflectograma del pilote 4 de la pila 2.....	77
Gráfico 3-15 Reflectograma del pilote 1 de la pila 3.....	77
Gráfico 3-16 Reflectograma del pilote 2 de la pila 3.....	78
Gráfico 3-17 Reflectograma del pilote 3 de la pila 3.....	78
Gráfico 3-18 Reflectograma del pilote 4 de la pila 3.....	79
Gráfico 3-19 Reflectograma del pilote 1 de la pila 4.....	79
Gráfico 3-20 Reflectograma del pilote 2 de la pila 4.....	80
Gráfico 3-21 Reflectograma del pilote 3 de la pila 4.....	80
Gráfico 3-22 Reflectograma del pilote 4 de la pila 4.....	81
Gráfico 3-23 Reflectograma del pilote 1 de la pila 5.....	81
Gráfico 3-24 Reflectograma del pilote 2 de la pila 5.....	82
Gráfico 3-25 Reflectograma del pilote 3 de la pila 5.....	82
Gráfico 3-26 Reflectograma del pilote 4 de la pila 5.....	83
Gráfico 3-27 Reflectograma del pilote 1 del estribo 2.....	83
Gráfico 3-28 Reflectograma del pilote 2 del estribo 2.....	84
Gráfico 3-29 Reflectograma del pilote 3 del estribo 2.....	84
Gráfico 3-30 Reflectograma del pilote 4 del estribo 2.....	85

Gráfico 3-31 Gráfico estadístico del número de pilotes ensayados del total de pilotes del Puente peatonal de Muisne.....	87
Gráfico 3-32 Gráfico estadístico de los resultados de los ensayos de integridad estructural en los pilotes del Puente peatonal de Muisne.....	87
Gráfico 3-33 Gráfico estadístico del número de pilotes ensayados según la medida de su diámetro.....	88
Gráfico 3-34 Gráfico estadístico del número de pilotes ensayados según la medida de su longitud.....	88
Gráfico 3-35 Gráfico estadístico del número de pilotes ensayados según la edad del hormigón al momento del ensayo.....	89
Gráfico 3-36 Evolución de la economía de los ensayos sónicos en pilotes.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo I

Tabla 1-1 Coordenadas de implantación del proyecto.....	4
Tabla 1-2 Clasificación según el grado de amenaza.....	18
Tabla 1-3 Valores del factor z en función de la zona sísmica.....	19
Tabla 1-4 Clasificación del suelo del sitio de implantación según SUCS-NEC.....	22
Tabla 1-5 Datos de pilotes.....	23

Capítulo II

Tabla 2-1 Parámetros característicos de los ensayos en pilotes.....	39
Tabla 2-2 Diferencias entre los métodos de impedancia mecánica y eco.....	39
Tabla 2-3 Porcentaje de pilotes a ensayar.....	45
Tabla 2-4 Interpretación de curvas reales de eco (Joram M. Amir).....	60
Tabla 2-5 Interpretación de curvas teóricas de eco (Joram M. Amir).....	61
Tabla 2-6 Interpretación de curvas teóricas de eco.....	62
Tabla 2-7 Factores de seguridad indirectos mínimos (FSIM).....	63
Tabla 2-8 Número mínimo de pruebas de carga para reducir los FSIM.....	64

Capítulo III

Tabla 3-1 Precio unitario del ensayo sísmico por pilote en el diseño de la cimentación del Puente peatonal de Muisne.....	90
---	----

RESUMEN

El presente documento expone los principales métodos de ensayo para la comprobación de la integridad estructural de pilotes, enfocándose especialmente en el método sónico o ensayo de eco.

Los pilotes al ser cimentaciones profundas son normalmente inaccesibles en su totalidad, lo que impide o dificulta la verificación de que el pilote se ha ejecutado correctamente, y así poder garantizar un adecuado comportamiento del mismo según las exigencias requeridas en el diseño. Con el fin de asegurar que los pilotes de la cimentación de una estructura se comporten según lo previsto en los cálculos, se deben realizar este tipo de ensayos para la comprobación de la integridad estructural de los mismos.

Se comienza definiendo los pilotes de hormigón armado construidos “in situ”, su campo de aplicación, su normativa aplicable en el país y los posibles fallos que se pueden presentar.

En la parte central del presente documento se intenta explicar el funcionamiento y la ejecución del método sónico o ensayo de eco, para luego poder interpretar los resultados obtenidos a través de los ensayos de integridad estructural en los pilotes del puente peatonal de Muisne, y así a través de las posibles anomalías que se puedan presentar en los reflectogramas determinar los posibles defectos físicos que pueden existir en el elemento.

Finalmente, luego de realizada la interpretación de cada una de las curvas de Eco que representan a cada uno de los pilotes que conforman los estribos y pilas del Puente peatonal de Muisne, se determinara el factor de seguridad óptimo en el diseño de la cimentación si se realiza este tipo de ensayos para el control de calidad de los pilotes.

ABSTRACT

This document sets out the main test methods for checking the structural integrity of piles, focusing in particular on the sonic echo pile test.

The piles like deep foundations are normally inaccessible in their entirety, which makes it difficult to verify that the pile has been built correctly, and thus we would guarantee an adequate behavior of the pile according to the requirements required in the design. In order to ensure that the foundation piles of a structure behave as predicted in the calculations, we must perform this type of tests to check the structural integrity of the piles.

This document begins defining the piles of reinforced concrete built "in situ", its field of application, its regulation in the country and possible failures that may arise.

In the central part of the present document we try to explain the operation and the execution of the sonic echo pile test, in order to be able to interpret the results obtained through the tests of structural integrity in the piles of the pedestrian bridge of Muisne. Through the possible anomalies that can occur in the piles, we can determine the possible physical defects that may exist in them.

Finally, after realizing the interpretation of the Echo curves that represent the piles that make up the stirrups and piers of the Muisne Pedestrian Bridge, we would determine the optimal safety factor in the design of the foundation if this type of tests are performed for the quality control of the piles.

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Los ensayos de integridad estructural de pilotes nos proporcionan datos sobre la continuidad a lo largo del fuste, de la homogeneidad del hormigón, de la consistencia de los materiales empleados para su fabricación y de sus dimensiones físicas, es decir, proporcionan una evaluación cualitativa del elemento.

Los ensayos no destructivos para el control de la integridad estructural de pilotes que se utilizan actualmente según CEDEX en “Recomendaciones para la ejecución e interpretación de ensayos de integridad de pilotes y pantallas in situ” (2008), son los siguientes:

- 1) El ensayo sónico, también conocido como ensayo de eco, consiste en dar un golpe con un martillo de mano en la cabeza del pilote para captar mediante un acelerómetro el movimiento de la cabeza del elemento originado por la onda de compresión producto del golpe del martillo. El ensayo se puede realizar tanto en pilotes perforados como en los prefabricados e hincados, siempre que la geometría sea cilíndrica o prismática.
- 2) El ensayo cross-hole ultrasónico, también conocido como ensayo de transparencia sónica, consiste en dejar previamente dos conductos vacíos paralelos en el interior del pilote, por donde se introducirán el emisor y el receptor de ultrasonidos que permitirán registrar el tiempo que demora la onda en recorrer el fuste del mismo. El tiempo dependerá de la distancia entre el emisor y el receptor, y de las irregularidades que existan a lo largo del pilote. Este método resulta apropiado para pantallas continuas y pilotes de grandes longitudes. El ensayo se realiza solo en pilotes perforados debido a la instrumentación previa que requiere el pilote.

Este tipo de ensayos no reemplazan a los ensayos estáticos de carga en pilotes, puesto que no brindan información directa sobre su comportamiento en condiciones de carga, pero proporcionan información rápida y económica de la presencia de defectos en los pilotes, lo que permite realizar un control de calidad de los mismos y ajustarse a un diseño más óptimo como lo permiten las normas internacionales cuando se realiza este tipo de ensayos.

Si se determina la presencia de irregularidades en el pilote, se debe establecer las causas que lo produjeron y si en esas condiciones puede ser apto o no para el fin que se pretende.

Los ensayos de carga en pilotes nos proporcionan datos sobre su comportamiento real en el terreno al ser sometidos a cargas mayores que las de servicio. Se ejecutan para verificación del diseño de la cimentación, pero resultan muy costosos debido a las enormes cargas que se tienen que aplicar sobre el pilote, por lo que en la actualidad han sido reemplazados por los ensayos de integridad estructural en obras de poco presupuesto.

1.2 JUSTIFICACION

Ante los eventos suscitados en el terremoto del 16 de abril del 2016 cuya magnitud fue de 7.8 en la escala de Richter y cuyo epicentro se dio entre las ciudades de Muisne y Pedernales, el Gobierno Nacional implementó un plan para reconstruir la infraestructura afectada en la zona costera del país, garantizando una menor vulnerabilidad de las mismas y una mayor capacidad de respuesta de la población.

Dentro del plan de reconstrucción impulsado por el Gobierno Nacional se encuentra el puente peatonal de 320 m de luz que conectará Muisne continente con Muisne insular, y servirá principalmente para una rápida evacuación de los habitantes de la isla ante la amenaza de un tsunami o ante la presencia de un movimiento telúrico.

La ciudad de Muisne se encuentra en una zona de alto riesgo sísmico según lo indica la Secretaria Nacional de Gestión de Riesgos que la cataloga con un grado de amenaza alto, por tal motivo es necesario construir un puente sismo resistente en el cual se debe garantizar la integridad estructural de los pilotes que son las bases de la cimentación del mismo, para que no existan problemas ante una desocupación inmediata y masiva de los siete mil habitantes de la Isla de Muisne, por el peso o el movimiento que produzcan durante la evacuación sobre la estructura del puente.

Debido al elevado costo que representan los ensayos estáticos de carga en pilotes y siendo los pilotes el rubro más representativo en este tipo de obras, es indispensable realizar los ensayos de integridad estructural de los mismos para poder reducir el número de pilotes que deben ser sometidos a los ensayos estáticos de carga.

Estos métodos no destructivos ayudan a reducir las incertidumbres que entrañan las cimentaciones profundas, lo que permite optimizar los coeficientes de seguridad empleados en el cálculo y así lograr un diseño más ajustado de la cimentación que genere de igual manera seguridad, economía y funcionalidad de la estructura.

En el Ecuador la demanda de estos ensayos se está incrementando exponencialmente debido a las grandes construcciones que se realizan principalmente en las zonas sísmicas del país, donde se requiere realizar un control de calidad para garantizar que no se produzcan colapsos de las estructuras ante la presencia de un movimiento sísmico o bajo las cargas de diseño.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Optimizar el factor de seguridad utilizado para el diseño de pilotes mediante la aplicación del método sónico con la utilización del equipo Pile Echo Tester.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implantar una guía de referencia para la ejecución e interpretación de los resultados del ensayo sónico.
- Analizar la optimización de los factores de seguridad para cimentaciones profundas que proponen algunas normativas internacionales.
- Determinar el costo que representa el uso de estos ensayos en el diseño de cimentaciones por pilotes.
- Establecer un formato para la caracterización del pilote, del entorno geotécnico, su sistema constructivo e incidencias durante su ejecución.

1.4 ANTECEDENTES

1.4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Nombre del proyecto: “Construcción emergente del puente peatonal y con ciclovía de la Isla de Muisne de 320 m de longitud.”

Provincia: Esmeraldas

Cantón: Muisne

Contratante: Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOB)

Contratista: Consorcio GEOMON

Fiscalizador: Ing. Diego Olmedo Toledo

Monto original del contrato: \$ 4'618.979,20

1.4.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROYECTO

La población de Muisne se desarrolla en dos lugares específicos: un sitio continental y otro insular, que se encuentran separados por el estero que forma la desembocadura del río Muisne en el Océano Pacífico.

Posteriormente al evento sísmico suscitado el 16 de abril del 2016, el Gobierno Nacional determinó la necesidad de que la población insular disponga de un puente que facilite la comunicación directa entre estos dos sitios, de tal forma que en el caso de ocurrencia de otro sismo de igual intensidad se disponga de un medio de evacuación rápido y seguro.

Ante la constante amenaza que experimenta la Isla de Muisne, siendo catalogada como un lugar inseguro para el desarrollo habitacional, el Gobierno Nacional sugirió a los habitantes de la Isla se trasladaran a las viviendas que les serán construidas en los sitios seguros establecidos por la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, por lo que se estableció que el diseño del puente no contemple el paso de vehículos para de esta manera evitar la proliferación de viviendas en esta zona de alta vulnerabilidad.

1.4.2.1 INFRAESTRUCTURA

El puente peatonal de Muisne que conectará al territorio continental con la Isla de Muisne tendrá una luz de 320 m y un ancho de tablero de 4.4 m, con una capacidad de 4 personas por metro cuadrado que permitirá además el paso de motos, tricimotos y bicicletas.

El puente, objeto de este estudio, se construirá sobre pilotes hormigonados “in situ”, estará conformado por dos estribos laterales y cinco pilas intermedias, estando cada uno apoyado sobre cuatro pilotes prebarrenados con camisa no recuperable de 10 mm de espesor.

El encepado de cada una de las tres pilas intermedias estará soportado por cuatro pilotes de 80 cm de diámetro que tendrán una profundidad de 44.7 m, el de las dos pilas extremas estará conformado por cuatro pilotes de 60 cm de diámetro y 31.5 m de profundidad, y el de los estribos estará apoyado por cuatro pilotes de 60 cm de diámetro y 20 m de profundidad.

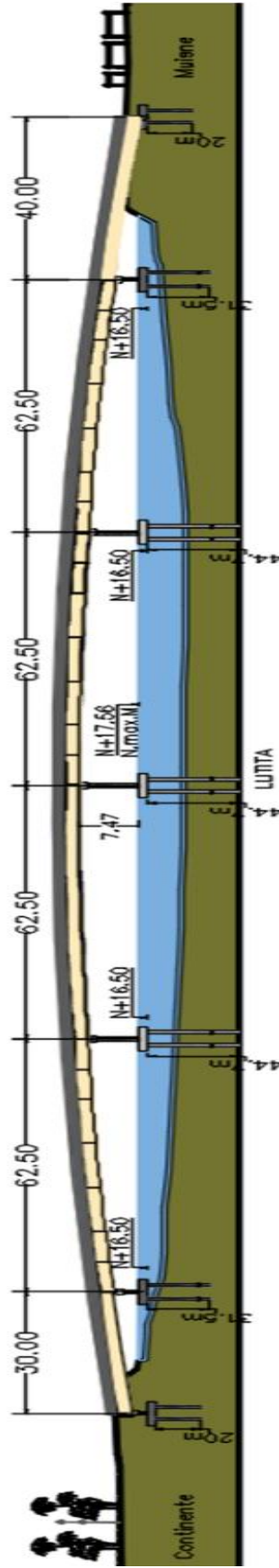


Gráfico 1-2 ELEVACIÓN PUENTE PEATONAL DE MUISNE
 Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

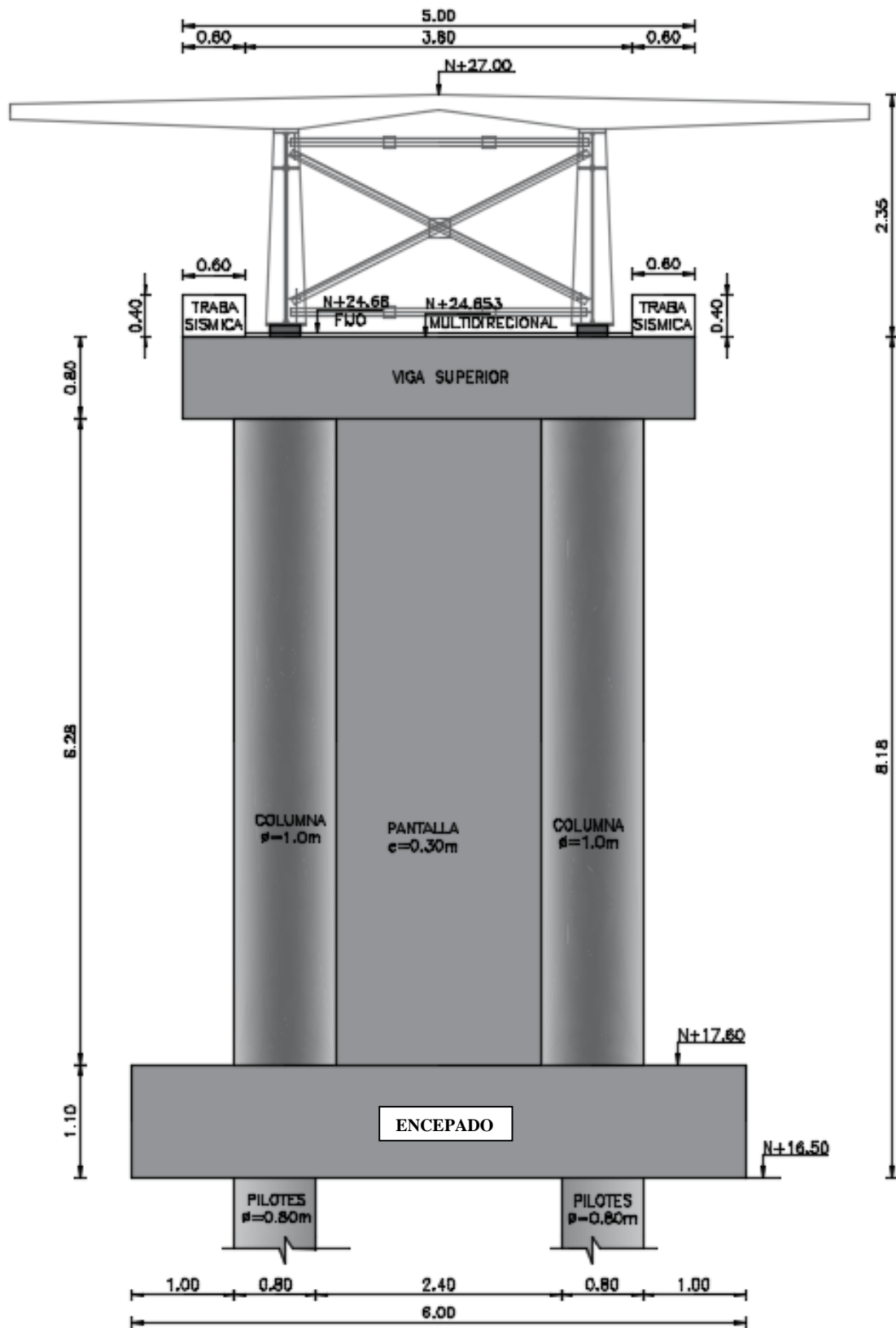


Gráfico 1-3 DETALLE FRONTAL DE PILAS CENTRALES
Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

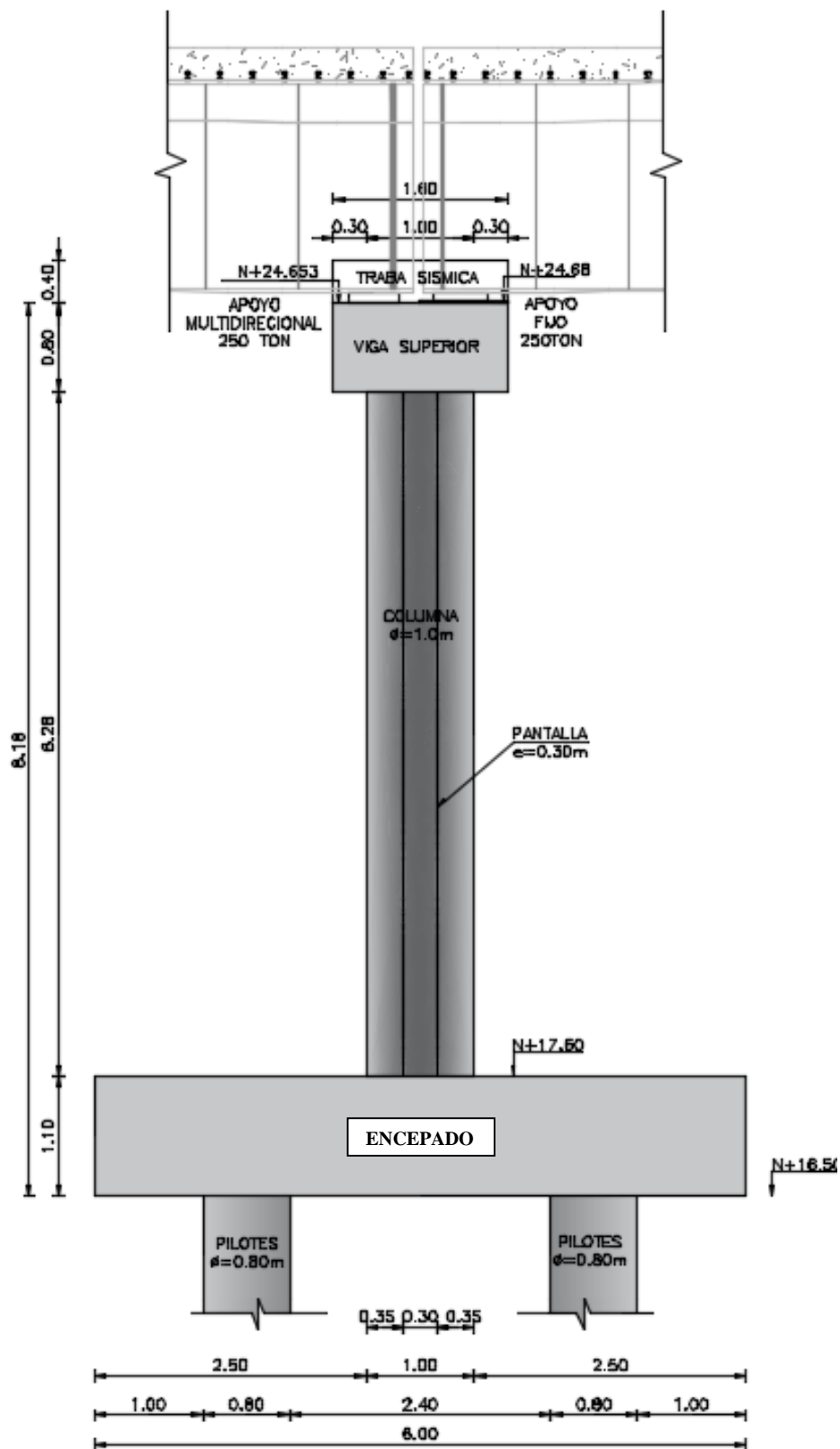


Gráfico 1-4 DETALLE LATERAL DE PILAS CENTRALES
Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

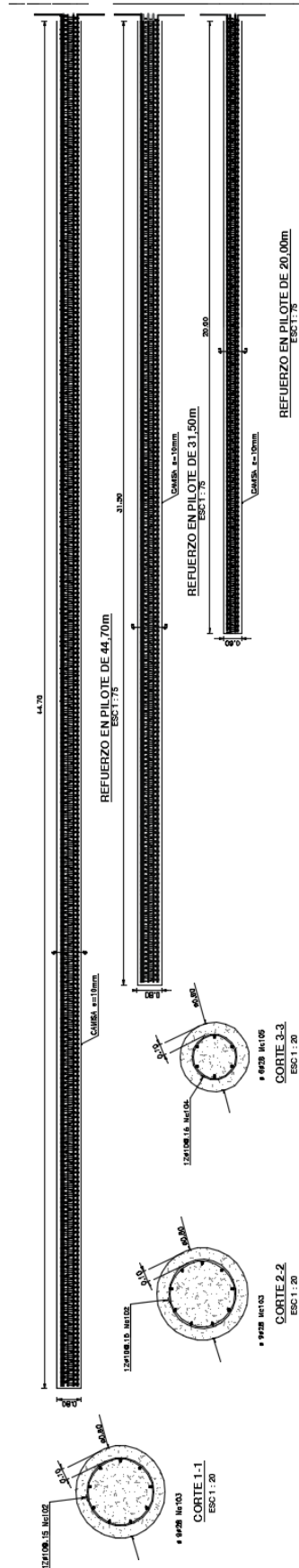


Gráfico 1-5 DETALLE DE ARMADURA DE LOS PILOTES
Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

1.4.2.2 SUPERESTRUCTURA

La superestructura define un puente continuo de seis tramos: cuatro intermedios con luces iguales de 62,50 metros y dos laterales: uno de 30 metros y el otro de 40 metros. La estructura resistente son vigas metálicas tipo “I” de acero estructural A-588 y tablero superior de hormigón armado.

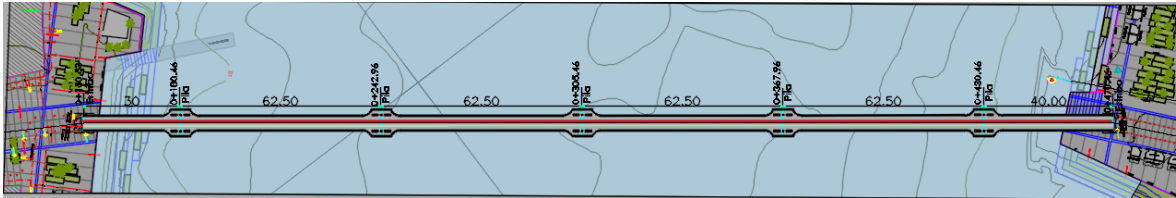


Gráfico 1-6 SECCIÓN LONGITUDINAL DEL PUENTE
Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

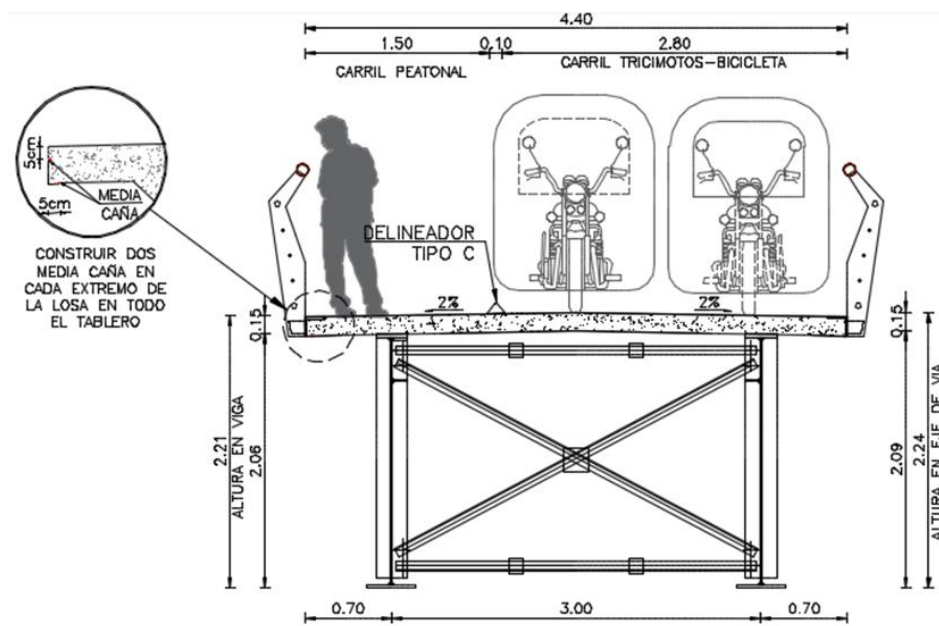


Gráfico 1-7 SECCIÓN TRANSVERSAL INTERMEDIA DEL PUENTE
Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

1.4.2.3 APOYOS ANTISÍSMICOS TIPO POT

Los apoyos antisísmicos utilizados en el Puente Peatonal de Muisne son del tipo POT que permiten resistir cargas gravitacionales y horizontales, y a la vez admiten pequeñas rotaciones alrededor de los ejes horizontales. MeKano4 en “Apoyos POT” (2016) indica que estos apoyos estructurales pueden ser diseñados para soportar cargas verticales hasta del orden de los 100.000 KN.



Gráfico 1-8 APOYO TIPO POT
Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

Estos apoyos estructurales son generalmente utilizados en la construcción de puentes en zonas sísmicas o en zonas con un riesgo latente de la presencia de un tsunami, por lo que son construidos en acero inoxidable para que no sean susceptibles a la corrosión que se puede presentar en este tipo de ambientes.

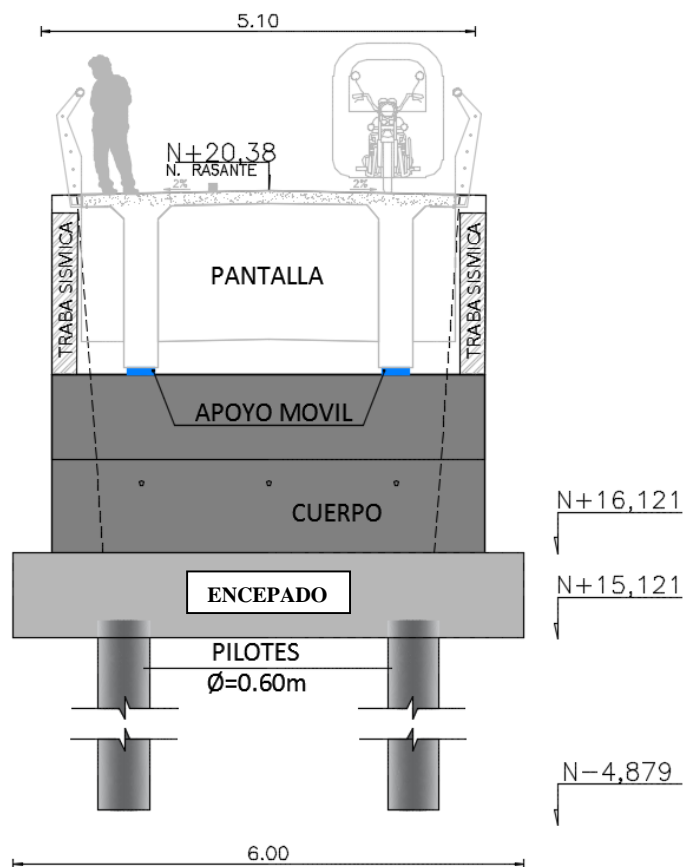


Gráfico 1-9 DETALLE DE APOYOS TIPO POT-PM SOBRE EL ESTRIBO DEL PUENTE
Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

Existen tres tipos de apoyos POT que se pueden adaptar a cada una de las necesidades especiales de cada proyecto. Entre ellos tenemos: el apoyo fijo PF que impide el movimiento en cualquier sentido horizontal, el apoyo guiado transversalmente PT que impide el movimiento horizontal en el sentido longitudinal, el apoyo guiado longitudinalmente PG que impide el movimiento horizontal en el sentido transversal y el apoyo multidireccional o libre PM que permite el movimiento en cualquier sentido horizontal.

En este caso de estudio se colocaron dos apoyos móviles tipo POT-PM1500 sobre el estribo del puente del lado continental y dos apoyos móviles tipo POT-PF1500 sobre el estribo del puente del lado insular, tal como se detalla en el Gráfico 1-9, y sobre la viga superior de cada pila del puente se colocaron dos apoyos fijos tipo POT-PF2500 y dos apoyos móviles tipo POT-PM2500. El número a lado de la denominación del tipo de apoyo indica el valor en KN de la carga vertical máxima que puede soportar el apoyo en mención.

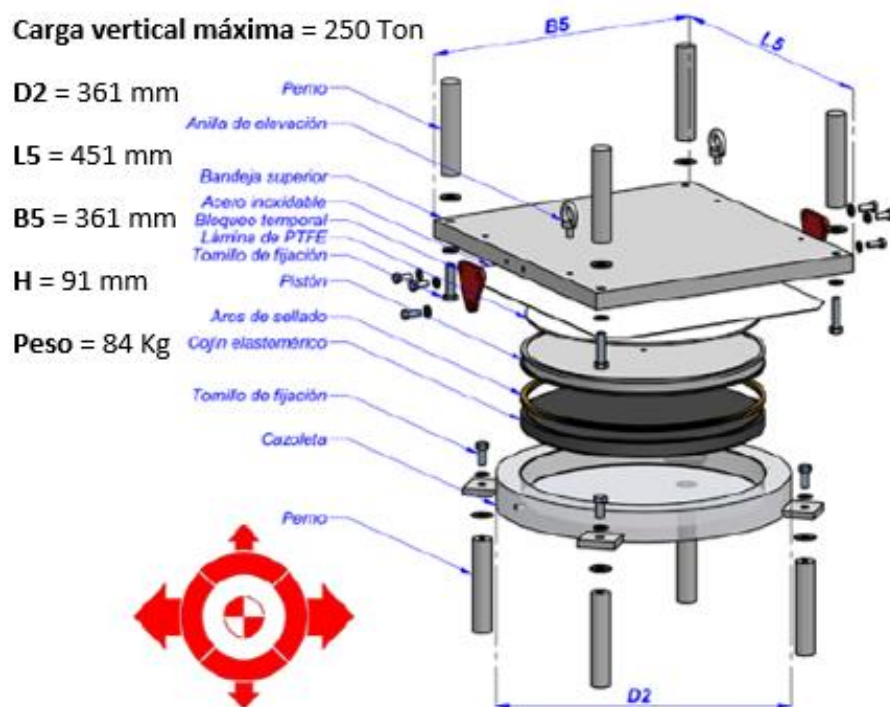


Gráfico 1-10 APOYO MULTIDIRECCIONAL TIPO PM
Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

Carga vertical máxima = 250 Ton

D2 = 333 mm

L5 = 333 mm

B5 = 333 mm

H = 85 mm

Peso = 65 Kg

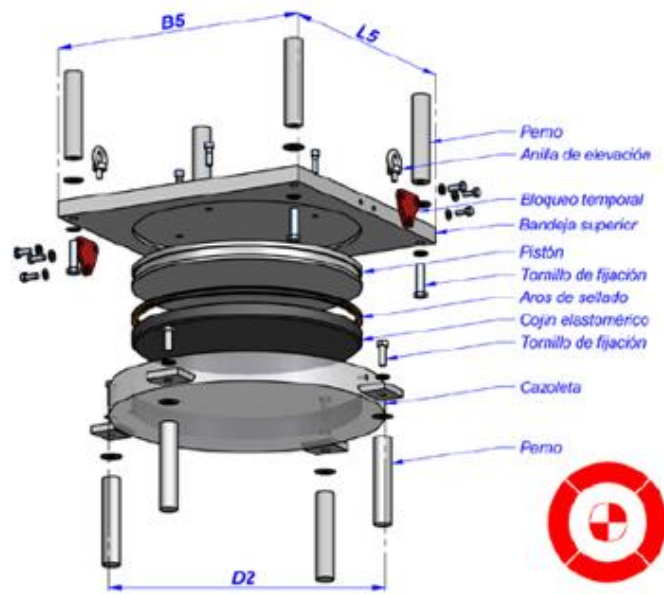


Gráfico 1-11 APOYO FIJO TIPO PF
Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

Estos apoyos antisísmicos cumplen con las exigencias de la Normativa Europea EN 1337-5, que indica que deben ser construidos con un disco elastomérico encerrado en un receptáculo de acero apto para resistir presiones muy altas del orden de los 25 N/mm^2 en elementos de hormigón, en el caso del objeto de estudio, se alcanzan presiones de hasta 10.62 N/mm^2 . El material elastomérico deberá actuar como un líquido viscoso que brinde algo de resistencia a la rotación.



Gráfico 1-12 APOYO FIJO TIPO PF EN PILA DEL PUENTE PEATONAL DE MUISNE
Fuente: (Josué Zumba Aguirre, 2016)



Gráfico 1-13 APOYO MÓVIL TIPO PM DEL PUENTE PEATONAL DE MUISNE
Fuente: (Josué Zumba Aguirre, 2016)

1.4.2.3.1 INSTALACIÓN DE APOYOS TIPO POT

Antes de realizar el hormigonado de los estribos o las pilas del puente, se debe dejar previamente cuatro conductos vacíos en su interior para introducir los pernos inferiores del apoyo. Estos conductos se construirán mediante la colocación de tubos de plástico, los cuales deben sobresalir para impedir el ingreso de hormigón durante el hormigonado. En el fondo del conducto se colocará un tapón de celulosa.

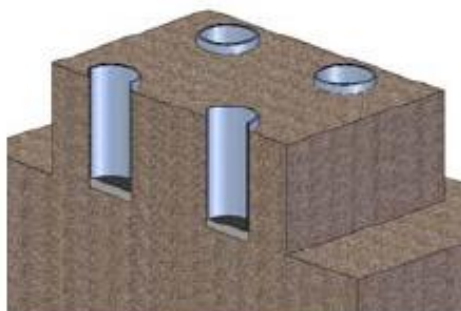


Gráfico 1-14 DISPOSICIÓN DE CONDUCTOS PARA COLOCACIÓN DE PERNOS DEL APOYO
Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

El apoyo se colocará asegurándose que se encuentre en una posición perfectamente horizontal. Se deberá proporcionar una holgura libre entre la base del apoyo y la cabeza del estribo o pila del pilote, que permita que el mortero de nivelación rellene completamente cada uno de los conductos.

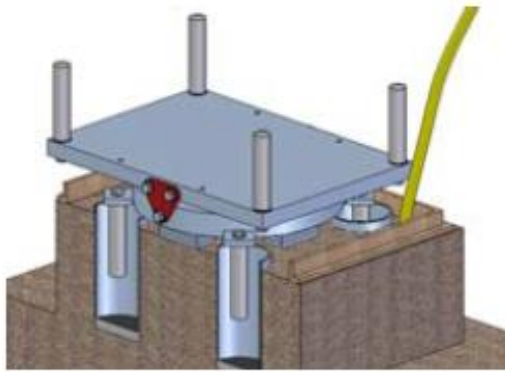


Gráfico 1-15 NIVELACIÓN DEL APOYO
Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

Los pernos superiores del apoyo deberán quedar embebidos luego del hormigonado del tablero del puente. Por último, una vez fraguado el hormigón se deberán retirar los bloques provisionales del apoyo.

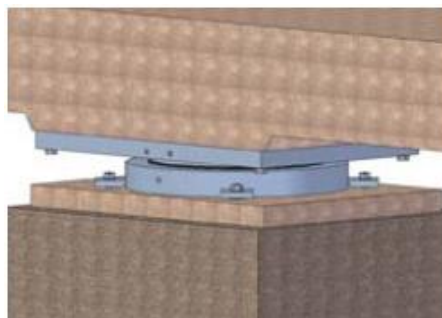


Gráfico 1-16 RETIRO DE BLOQUEOS TEMPORALES DEL APOYO
Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

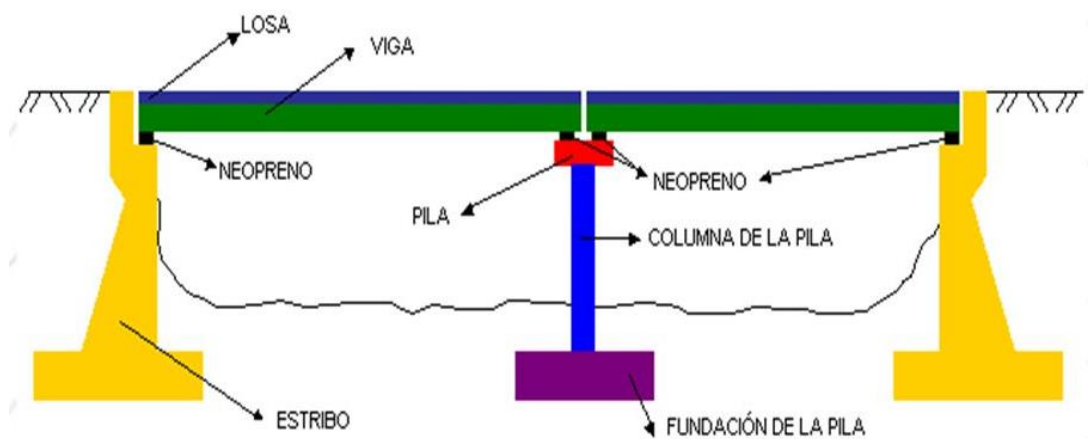


Gráfico 1-17 MODELO DEL PUENTE PEATONAL DE MUISNE
Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

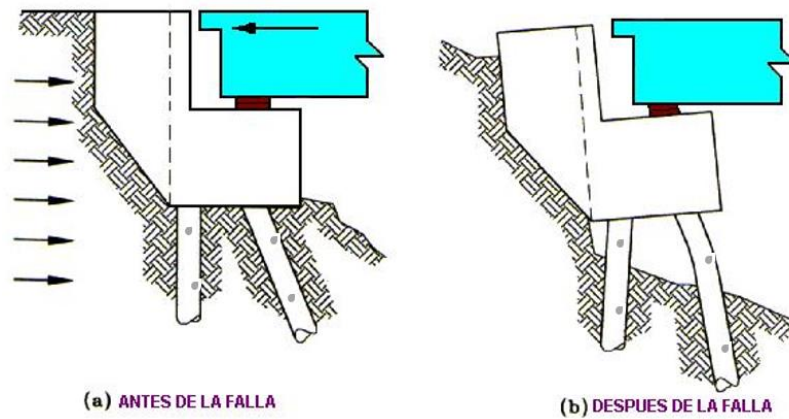


Gráfico 1-18 MODELO DE UN ESTRIBO CON DEFECTOS EN SUS PILOTES

Fuente: (Daniel Gómez García, 2010)

Elaborado por: Josué Zumba, Abril 2017

Como se puede observar en el Gráfico 1-18, un puente con apoyos antisísmicos que presenta defectos en los pilotes que soportan sus estribos, ante la presencia de cargas laterales producto de un movimiento sísmico no tendrá el comportamiento esperado. Ante lo expuesto, resulta necesario ejecutar los ensayos de integridad estructural para realizar una evaluación cualitativa de los pilotes, que permita garantizar un adecuado comportamiento de la estructura y un buen desempeño en la función de los apoyos antisísmicos.

1.4.2.4 OBRAS MISCELÁNEAS

El puente dispone de varias obras misceláneas, entre las que se destacan las siguientes:

- 1) Obras de remodelación y rehabilitación en los Malecones.
- 2) Obras de iluminación del puente.
- 3) Miradores ubicados en la superestructura con cubiertas decorativas.

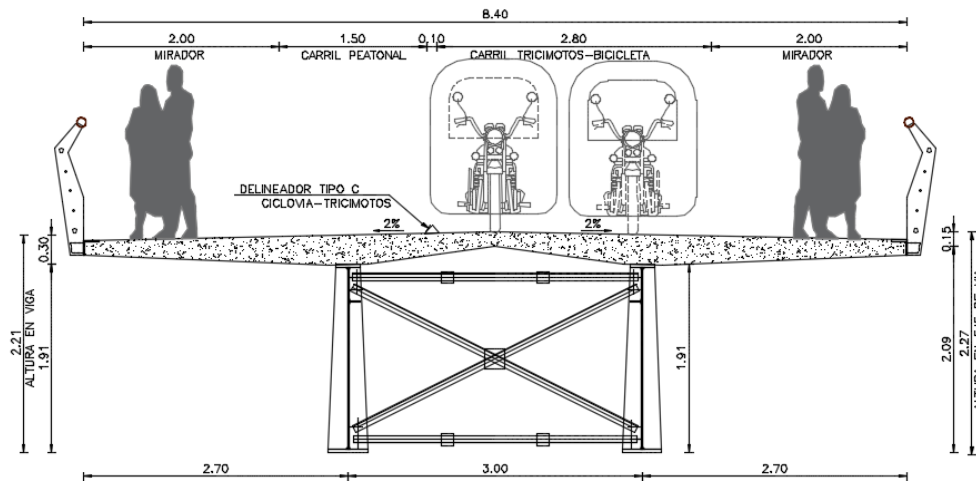


Gráfico 1-19 SECCIÓN TRANSVERSAL EN PILAS DEL PUENTE

Fuente: (Ing. Diego Olmedo, 2016)

1.5 GEOMORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA DEL SECTOR

Se debe indicar que en este apartado la información mencionada corresponde al sector donde se encuentra el puente en mención, mas no necesariamente caracteriza al sitio mismo de implante de la estructura.

El área de estudio según el Mapa Geológico de la República del Ecuador, está conformada por extensas planicies en el área de las playas y pequeñas elevaciones formadas por sedimentos marinos terciarios que se van formando hacia el interior continental, constituidos desde su base hasta la superficie por una secuencia de lutitas, tobas, arcillas silíceas, areniscas de grano grueso, areniscas masivas de grano fino y lutitas finamente estratificadas.

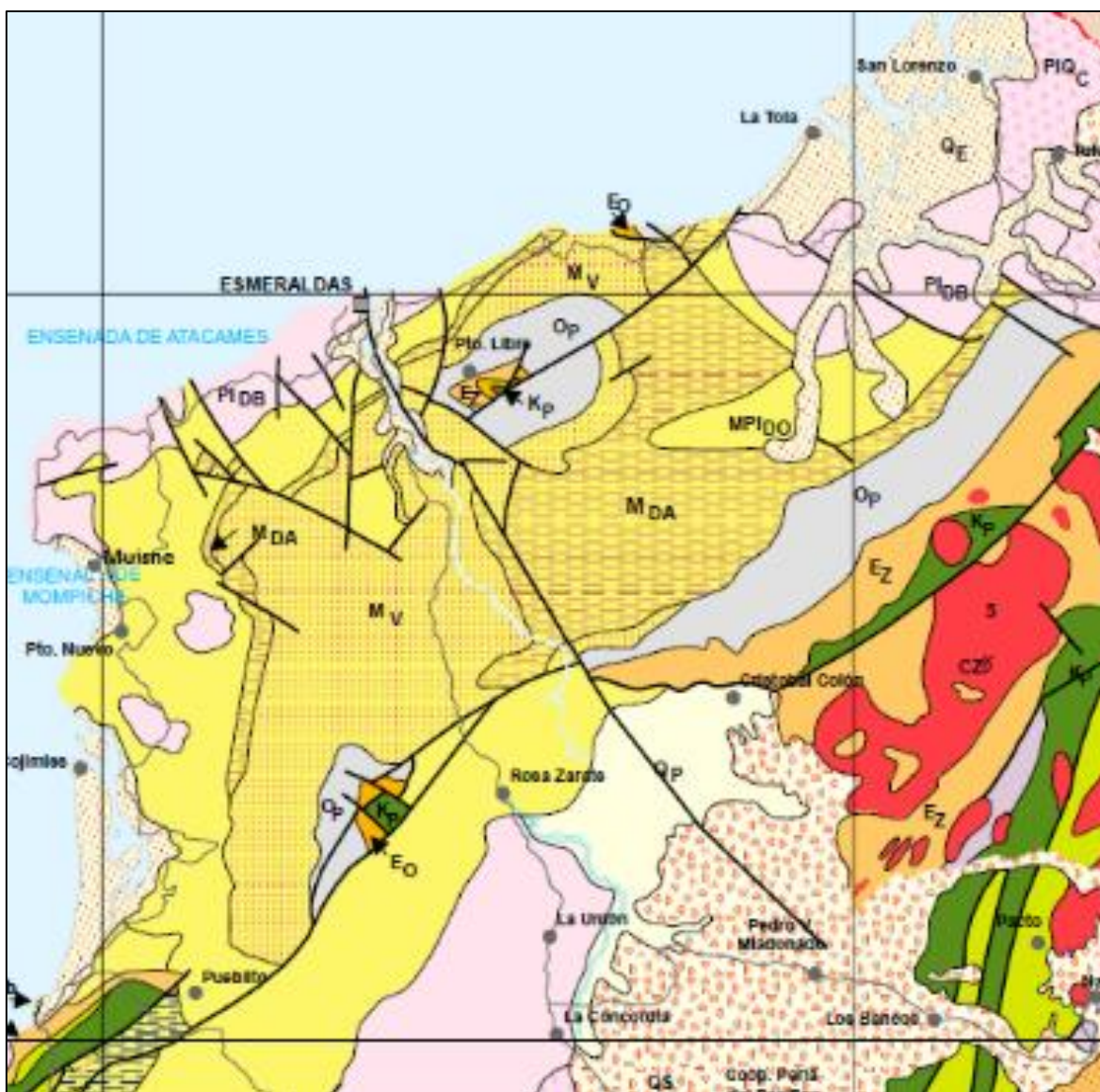


Gráfico 1-20 IDENTIFICACIÓN GEOLÓGICA DEL CANTÓN MUISNE
Fuente: (Mapa Geológico de la República del Ecuador, Escala 1:1'000.000, 1993)

Se identifican cinco tipos de amenazas naturales de importancia en la zona noroccidental de la provincia de Esmeraldas, tales como sismos, inundaciones, sequías, deslizamientos y tsunamis, presentando al mismo tiempo un alto grado de vulnerabilidad que la convierte en una zona de riesgo alto. El grado de cada amenaza depende de la probabilidad, peligrosidad y extensión con la que puede ocurrir en un determinado sitio. La ciudad de Muisne presenta un grado de amenaza alto según se indica en la Tabla 1-2.

Cantón	Grado de amenaza sísmica /3	Grado de amenaza de tsunami /2	Grado de amenaza volcánica /3	Grado de amenaza de inundación /3	Grado de amenaza de deslizamiento /3	Grado de amenaza de sequía /2	Valor amenaza global /16	Grado amenaza global
Muisne	3	2	0	2	1	0	8	Alto

Tabla 1-2 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL GRADO DE AMENAZA
 Fuente: (Amenazas, vulnerabilidad, capacidades y riesgo en el Ecuador, 2003)
 Elaborado por: Josué Zumba, Abril 2017

El Ecuador al encontrarse en el cinturón de fuego del Pacífico está expuesto a una gran actividad sísmica y volcánica acentuándose con la presencia de una zona de subducción entre la placa oceánica de Nazca y la placa continental Sudamericana.

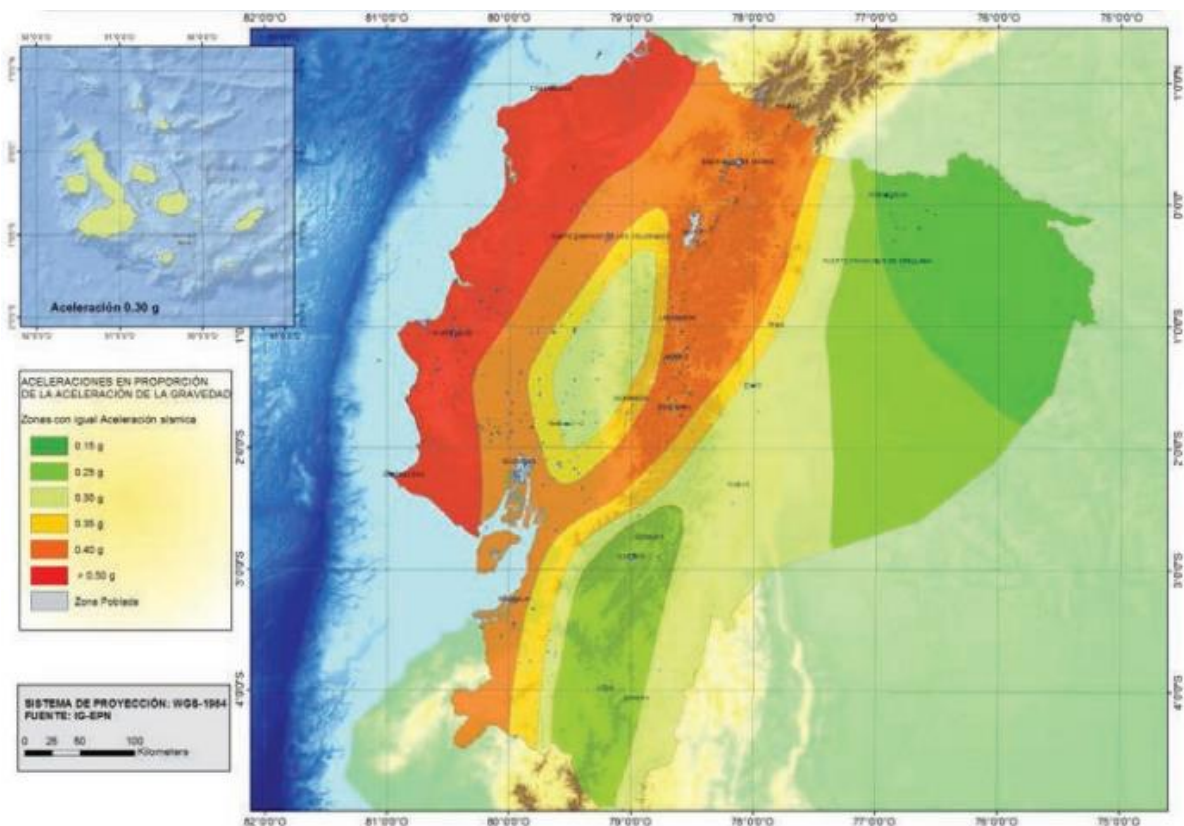


Gráfico 1-21 ZONAS SÍSMICAS DEL ECUADOR
 Fuente: (NEC, 2015)

La NEC estableció un mapa de zonificación sísmica que está compuesto de seis zonas de acuerdo a su caracterización de peligro sísmico, y donde se puede evidenciar que la zona de estudio se encuentra en la zona VI la de mayor peligrosidad sísmica del país.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Tabla 1-3 VALORES DEL FACTOR Z EN FUNCIÓN DE LA ZONA SÍSMICA
Fuente: (NEC, 2015)

Los requerimientos mínimos para el diseño de estructuras que establece la NEC están basados en evitar el colapso de las estructuras, para así proteger la vida de la personas ante cualquier evento sísmico que se pueda presentar. Estas estructuras deben resistir las fuerzas gravitacionales y las fuerzas laterales según la zona sísmica en la que se encuentren implantadas, cumpliendo además que las derivas de piso sean inferiores a las admisibles y que disipen la energía de deformación inelástica a través de técnicas de control sísmico.

El riesgo por tsunami según la Secretaria Nacional de Gestión de Riesgos se dirige en especial a las poblaciones asentadas a niveles inferiores a 50 msnm, especialmente si estas ya han sido afectadas por agujajes, lo que se complicaría al no existir vías de evacuación ni obras de mitigación conjuntamente con la presencia de construcciones con alto grado de precariedad, por otra parte, los riesgos por inundaciones son evidentes en los asentamientos ubicados en las riberas de los ríos a distancias de hasta 50 m de su cauce; por lo que resulta evidente la presencia de estos riesgos en la ciudad de Muisne, donde además en su parte sur se está perdiendo cobertura vegetal (manglares) y suelo por el ingreso constante del mar.

El puente peatonal de Muisne se encuentra ubicado a 1800 m de un relieve de plataforma con una cota de 10 m que permite ser una zona segura ante la constante amenaza de un tsunami que puede producir una cota de inundación de alrededor de 8 m, considerando una velocidad promedio del trotar de una persona de alrededor de 6 km/h se puede determinar que el tiempo de evacuación de las personas que habitan la Isla de Muisne ante la alerta de un tsunami será de 35 min lo que antes podría tomar aproximadamente una hora, por lo que resulta evidente que la construcción de este puente permitirá salvaguardar la vida de las personas que habitan en la Isla.



Gráfico 1-22 CARTA DE INUNDACIÓN DE MUISNE POR TSUNAMI
Fuente: Carta-SNGR-CITs-080350-Muisne (SNGR, 2012)

Los movimientos en masa son procesos geodinámicos que ocurren debido a la morfología y sismicidad del Ecuador, y son una amenaza constante para las estructuras que se encuentran en su zona de influencia.

El puente peatonal de Muisne al ser una construcción que permitirá la evacuación de la población ante la alerta de un tsunami debe ser diseñado para que no sea vulnerable ante una amenaza de movimientos en masa, pero como se puede observar en el Gráfico 1-23 la zona de estudio no se encuentra expuesta ante tal situación debido al relieve que presenta el terreno en el sector del sitio de implantación de la estructura.

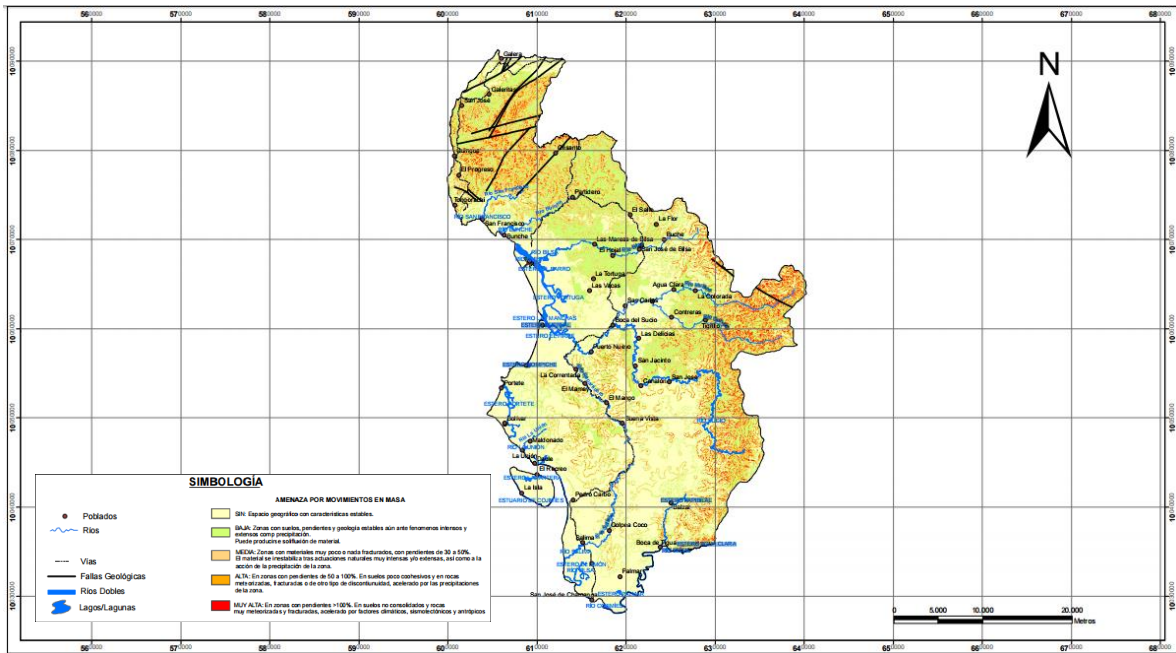


Gráfico 1-23 ZONAS DE AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL CANTÓN MUISNE
Fuente: (SNGR, 2011)

1.6 ESTUDIO DEL SUELO DEL SITIO DE IMPLANTACIÓN

La apropiada caracterización del subsuelo es uno de los principales factores que permite un diseño seguro y económico de la cimentación de las estructuras. Para conseguir esta caracterización, se deberá tener conocimiento del tipo de proyecto y la variabilidad de los estratos en el sitio de implantación de la estructura.

El Ing. Wilson Cando realizó el estudio del suelo del sitio de implantación de la estructura mediante perforaciones del suelo con una máquina perforadora a rotación-percusión, realizando una perforación de 30 metros de profundidad en cada estribo del puente y una perforación de 50 metros de profundidad en cada pila del puente. La investigación del subsuelo se extendió hasta alcanzar un estrato de capacidad soportante adecuada para el propósito del diseño de la cimentación y para evitar los efectos de licuefacción producidos por la presencia de turbas en el terreno, por lo que al encontrarse roca, arcillas consolidadas o aluviales gruesos se procedió a realizar metros adicionales de perforación con el objeto de determinar la potencia del estrato necesaria para evitar estos fenómenos de licuación.

El perfil de socavación en máxima creciente, la capacidad portante y la deformación máxima del suelo incidieron en la elección del tipo y profundidad de cimentación. Los resultados del estudio realizado determinaron que la solución más óptima es la de ejecutar una cimentación profunda con pilotes prebarrenados construidos utilizando entubación no recuperable.

H (m)	ESTRIBO 1		ESTRIBO 2		PILA 3		PILA 4		PILA 5	
	SUCS	NEC	SUCS	NEC	SUCS	NEC	SUCS	NEC	SUCS	NEC
1.0	SM	D	MH	E	SM	E	SM	E	MH	E
2.0	ML	E	MH	E	SM	D	Pt	F	SM	D
3.0	ML	E	MH	E	SM	E	Pt	F	SM	D
4.0	Pt	F	SM	E	MH	E	Pt	F	GM	D
5.0	Pt	F	SM	D	Pt	E	Pt	F	SM	D
6.0	SM	D	SM	D	MH	E	MH	E	SM	D
7.0	SC	D	SM	D	MH	E	MH	E	GM	D
8.0	SC	D	CL	D	MH	E	MH	E	SM	D
9.0	SC	D	SM	D	SM	E	MH	E	MH	E
10.0	SC	D	SM	D	MH	E	CL	E	MH	ED
11.0	SC	D	SM	D	MH	E	MH	D	MH	D
12.0	SC	D	SM	D	MH	E	MH	D	MH	D
13.0	MH	E	CL	D	MH	E	MH	D	MH	D
14.0	MH	E	CL	E	SM	D	MH	D	MH	D
15.0	MH	E	CL	E	GM	D	MH	D	MH	D
16.0	MH	E	MH	E	SM	D	MH	D	MH	D
17.0	MH	E	MH	D	CL	D	MH	D	MH	D
18.0	GC	D	MH	D	SM	D	Pt	F	CL	D
19.0	SM	D	MH	D	MH	D	Pt	F	Pt	F
20.0	SM	E	MH	D	SM	E	Pt	F	Pt	F
21.0	MH	D	MH	D	MH	E	Pt	F	MH	E
22.0	SM	D	SM	D	Pt	E	MH	E	Pt	F
23.0	SM	D	SM	D	SM	E	MH	E	MH	D
24.0	SM	E	GM	D	SM	E	Pt	F	CL	D
25.0	SM	D	SM	D	MH	E	Pt	F	MH	D
26.0	SC	E	SM	D	Pt	E	Pt	F	MH	D
27.0	SC	E	SM	D	MH	E	Pt	F	Pt	F
28.0	SC	E	MH	D	MH	E	Pt	F	MH	D
29.0	SC	E	SM	E	MH	E	Pt	F	Pt	F
30.0	MH	D	MH	E	MH	E	Pt	F	Pt	F
31.0					MH	E	Pt	F	MH	D
32.0					Pt	E	Pt	F	MH	D
33.0					MH	D	Pt	F	MH	D
34.0					MH	D	Pt	F	MH	D
35.0					Pt	D	LUTITA	D	MH	D
36.0					MH	D	LUTITA	D	MH	D
37.0					MH	D	LUTITA	D	MH	D
38.0					MH	D	LUTITA	D	LUTITA	D
39.0					CL	D	LUTITA	D	LUTITA	D
40.0					MH	D	LUTITA	D	LUTITA	D
41.0					LUTITA	D	LUTITA	D	LUTITA	D
42.0					LUTITA	D	LUTITA	D	LUTITA	D
43.0					LUTITA	D	LUTITA	D	LUTITA	D
44.0					LUTITA	D	LUTITA	D	LUTITA	D
45.0					LUTITA	D	LUTITA	D	LUTITA	D
46.0					LUTITA	D	LUTITA	D	LUTITA	D
47.0					LUTITA	D	LUTITA	D	LUTITA	D
48.0					LUTITA	D	LUTITA	D	LUTITA	D
49.0					LUTITA	D	LUTITA	D	LUTITA	D
50.0					LUTITA	D	LUTITA	D	LUTITA	D

Tabla 1-4 CLASIFICACIÓN DEL SUELO DEL SITIO DE IMPLANTACIÓN SEGÚN SUCS – NEC

Fuente: (Ing. Wilson Cando, 2016)

Elaborado por: Josué Zumba, Abril 2017



Gráfico 1-24 UBICACIÓN DE SITIOS DE PERFORACION

Fuente: (Ing. Wilson Cando, 2016)

Elaborado por: Josué Zumba, Abril 2017

Según se indica en la Tabla 1-4, los pilotes que conforman las tres pilas intermedias del puente se encuentran sobre un estrato de suelo del tipo lutita, que se puede definir como una roca sedimentaria detrítica compuesta de partículas consolidadas del tamaño del limo y la arcilla que la hacen un material impermeable. Este tipo de suelo presenta contenido de material orgánico y probablemente se formó por una sedimentación gradual producto de corrientes muy tranquilas cerca de la desembocadura del Rio Muisne en el Océano Pacifico. La capacidad portante de las rocas sedimentarias del tipo lutita está entre 8 y 10 kg/cm².

Por otra parte, los pilotes que soportarán los estribos del puente y las dos pilas extremas estarán empotrados en un suelo MH según la clasificación SUCS, que se lo puede definir como un suelo limoso semipermeable de alta plasticidad sin presencia de materia orgánica.

	Estribo 1	Estribo 2	Pila 3	Pila 4	Pila 5	Pila 6	Pila 7
Carga por pilote	89 TON	99 TON	404 TON	191 TON	306 TON	230 TON	180 TON
Cota cabeza del pilote	15.121 msnm	15.121 msnm	16.5 msnm	16.5 msnm	16.5 msnm	16.5 msnm	16.5 msnm
Cota punta del pilote	-4.879 msnm	-4.879 msnm	-28.20 msnm	-28.20 msnm	-28.20 msnm	-15 msnm	-15 msnm

Tabla 1-5 DATOS DE PILOTES

Fuente: (Ing. Wilson Cando, 2016)

Elaborado por: Josué Zumba, Abril 2017

Con base en lo expuesto, el Ingeniero Geotécnico realizo el análisis de la estabilidad de la cimentación para evaluar su capacidad portante y verificar si los asentamientos se encuentran dentro de los admisibles.

CAPÍTULO II

2. DESARROLLO DEL TRABAJO

2.1 PILOTES

Los pilotes son elementos estructurales que pueden trabajar de forma aislada o formando grupos, capaces de distribuir las cargas gravitacionales provenientes de la estructura hasta un estrato del suelo con la capacidad de carga suficiente para soportar las cargas transmitidas, y con capacidad de transferir las cargas sísmicas entre la estructura y el terreno.

Las cimentaciones por pilotes son empleadas en los terrenos de poca resistencia, en los terrenos acuíferos, cuando el terreno consistente se encuentra a gran profundidad, cuando las cargas y sobrecargas que soportarán las estructuras son muy grandes, y en la configuración de pantallas que facilitan la ejecución de excavaciones profundas, es decir, siempre que los otros sistemas de cimentación resulten demasiado costosos por el gran volumen de excavación y movimiento de tierras.

También utilizamos este tipo de cimentación profunda cuando se tiene plazos de ejecución limitados que impide realizar otro tipo de cimentación, principalmente porque se puede mecanizar la ejecución de los pilotes permitiendo una mayor productividad a través de la necesidad de una mano de obra mínima.

Los pilotes son considerados como los más indeformables de todos los sistemas de cimentación, a pesar de ello CEDEX en “Recomendaciones para la ejecución e interpretación de ensayos de integridad de pilotes y pantallas in situ” (2008), expone los fallos que se pueden presentar causados por la ejecución del pilotaje o por causas no atribuibles a la estructura de los propios pilotes:

- 1) Falta de información geotécnica que dé lugar a pilotes cortos o excesivamente largos. Este error es más fácil que se produzca en pilotes excavados que en pilotes hincados.
- 2) Sobrecargas por rozamiento negativo debido al colapso de un terraplén en las cercanías, lo que produce desplazamientos horizontales que rompen los pilotes a flexión.
- 3) La existencia de estratos blandos dentro del bulbo de presiones del pilote aislado: falta de empotramiento.
- 4) Cuando el pilote aislado tiene un bulbo de presiones incluido en el estrato resistente mientras que el del grupo, por su mayor tamaño, llega a afectar suelos más blandos.

- 5) Los fallos de ejecución que ocasionan discontinuidades en el fuste pueden causar asentamientos o incluso hasta el colapso de la cimentación.

Actualmente, se pueden construir pilotes con profundidades superiores a los 60 m, con diámetros que alcanzan los 4 m y que pueden llegar a soportar cargas concentradas de hasta alrededor de los 20000 KN.

2.1.1 PILOTES DE HORMIGÓN ARMADO

Los pilotes de hormigón armado más utilizados según Fernández Tadeo en “Técnicas modernas para el ensayo de pilotes y cimentaciones profundas” (2000), son los siguientes:

- 1) Pilotes prefabricados: Son construidos generalmente fuera de la obra y se penetran en el terreno utilizando el método de hincado, pueden ser también de hormigón pretensado.
- 2) Pilotes construidos “in situ” con desplazamiento: Se introduce en el terreno mediante el proceso de hincado una tubería con un azuche o un tapón de gravas, que generan el desplazamiento del terreno para posteriormente realizar el vertido del hormigón.
- 3) Pilotes construidos “in situ” con extracción: Para su ejecución se debe realizar previamente la extracción del terreno mediante procedimientos con entubación recuperable o perdida (trépanos y cucharas), sin entubación (lodos bentoníticos), sin entubación ni lodos (barrena continua o discontinua) o sin métodos de contención (pilotes en seco) en terrenos estables y no propensos al hundimiento.
- 4) Micropilotes: Son pilotes con diámetros que oscilan entre los 7.5 cm y los 29 cm.

También se pueden utilizar pilotes mixtos que incluyen combinaciones del hormigón con materiales de madera o metálicos.

Los pilotes de hormigón-madera están configurados de manera que el elemento de hormigón se ubique sobre el nivel freático y el elemento de madera en la parte inferior, lo que permite una mayor durabilidad que la que se puede obtener con un pilote de madera.

Los pilotes de hormigón-acero son tubos con armaduras rellenos de hormigón donde el principal riesgo es la generación de roturas y tracciones del acero producto del hinchamiento del hormigón.

En todos los pilotes mixtos la zona más débil es la junta de unión de los dos materiales, puesto que debe permitir una adecuada trasmisión de la totalidad de la carga soportando grandes esfuerzos de tracción y de flexión.

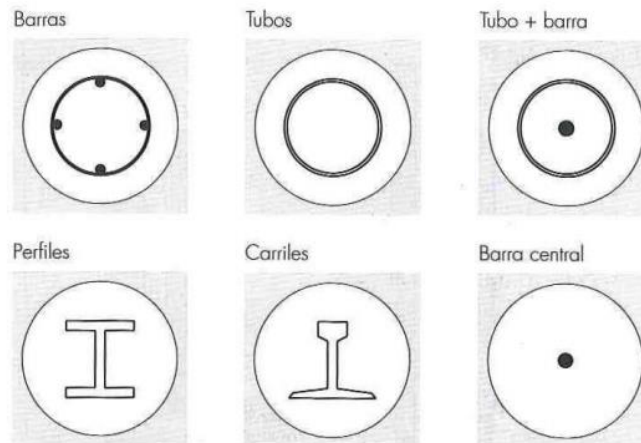


Gráfico 2-1 TIPOS DE ARMADURAS DE PILOTES DE HORMIGÓN
Fuente: (Daniel Gómez García, 2010)

2.1.1.1 PILOTES DE HORMIGÓN ARMADO SIN DESPLAZAMIENTO

Son los pilotes que han sido moldeados en el interior del terreno utilizando principalmente métodos de perforación continua o discontinua y mecanismos de contención para estabilización de paredes siempre que se tenga una forma geométrica definida.

El elemento pilote configurado en el interior del terreno puede estar conformado por:

- Hormigón en masa.
- Hormigón armado.
- Hormigón pretensado.

El hormigón que conformará el elemento pilote deberá tener las siguientes características:

- Fluidez y buena cohesión.
- Trabajabilidad y alta plasticidad.
- Capacidad de autocompactación.

La cuantía de acero longitudinal mínima depende directamente de la sección transversal del elemento pilote.

El recubrimiento mínimo de la armadura del pilote según Fernández Tadeo en “Técnicas modernas para el ensayo de pilotes y cimentaciones profundas” (2000), está influenciado directamente por su diámetro, así para diámetros menores o iguales a 60 cm se deberá colocar un recubrimiento de 5 cm y para diámetros mayores a 60 cm un recubrimiento de 6 cm.

El recubrimiento mínimo será de 7.5 cm si se cumple con alguno de los siguientes casos:

- Ejecución del hormigonado sin encamisado.
- Presencia de un depósito de suelo blando.
- Emplazamiento de la armadura posteriormente al vertido del hormigón.
- La sección del pilote se encuentre rodeada de agua.

El recubrimiento mínimo de la armadura puede reducirse a 4 cm cuando se utilice camisa no recuperable o perdida. La tubería deberá ser de acero de 2 mm mínimo de espesor lo que permitirá asegurar la continuidad a lo largo del fuste del pilote y el adecuado fraguado del hormigón ante la presencia de flujos de agua, elementos agresivos y oquedades blandas del suelo circundante.

Para el caso de estudio se consideró un recubrimiento de 10 cm para la armadura que conforma el pilote, cumpliendo con las dimensiones de recubrimiento mínimo debido a que el recomendado es de 4 cm si se utiliza camisa no recuperable con un espesor de 2 mm, sin embargo, el espesor de la camisa utilizada es de 10 mm muy superior al recomendado.

2.1.1.1.1 EJECUCIÓN

La ejecución de los pilotes barrenados contempla la posible aparición de problemas influenciados por la liberación incontrolada de agua y las características del terreno circundante y/o resistente, entre los cuales Fernández Tadeo en “Técnicas modernas para el ensayo de pilotes y cimentaciones profundas” (2000) menciona los siguientes:

- Inestabilidad o hundimiento del terreno circundante y/o resistente.
- Provocación de daños en el hormigón fresco de los pilotes que se encuentran en sus proximidades.
- Presencia de coqueras en el fuste del pilote.
- Lavado del hormigón fresco y arrastre de cemento y material fino.

Las técnicas utilizadas para evitar o reducir los problemas mencionados son:

- Entubación parcial o total y recuperable o pérdida.
- Utilización de lodos bentoníticos capaces de contener el terreno.
- Perforación mediante el uso de barrenas continuas, para contención del terreno.
- Rellenar las aletas de la hélice continua con material del terreno.

Ante la presencia de terrenos inestables se deberá hincar el entubado antes de ejecutar la perforación del terreno; sin embargo, si el terreno en la punta del pilote es estable no será necesario la introducción de la camisa hasta la punta del elemento.

Las herramientas utilizadas para los métodos de perforación discontinua son: cuchara rotatoria, cuchara de almeja, hélices y trépano, y las utilizadas para los métodos de perforación continua son: barrena continua, herramientas de rotación y/o percusión.

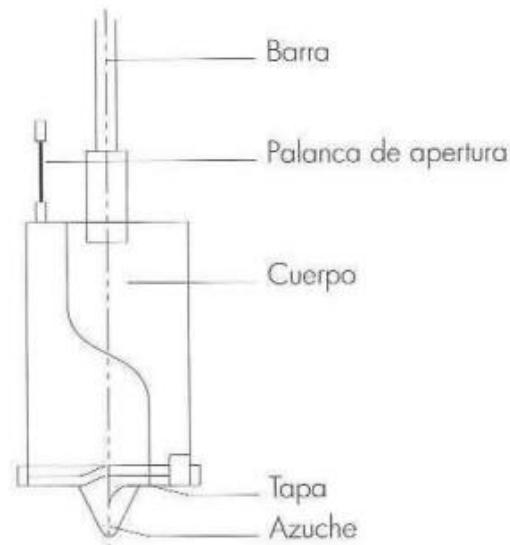


Gráfico 2-2 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE PERFORACIÓN CON CUCHARA ROTATORIA
Fuente: (Daniel Gómez García, 2010)

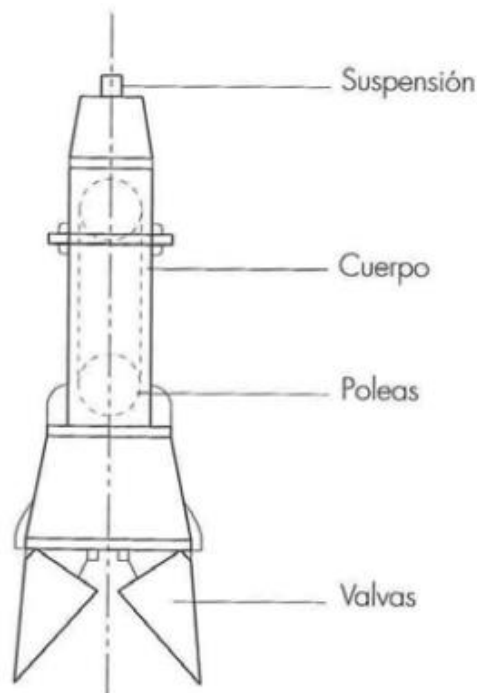


Gráfico 2-3 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE PERFORACIÓN CON CUCHARA DE ALMEJA
Fuente: (Daniel Gómez García, 2010)

Se deberá proteger la boca de la perforación mediante emboquillado para evitar el desmoronamiento de material suelto y salvaguardar la seguridad del personal, solo se podrá prescindir del emboquillado en terrenos firmes y pilotes con diámetros menores a 60 cm.

La perforación para cada uno de los pilotes que conforman el puente peatonal de Muisne se realizó mediante el método de perforación discontinua, donde se barrenaba hasta un cierto intervalo de profundidad y se retiraba el lodo utilizando cuchara rotatoria, así sucesivamente hasta alcanzar roca o suelo firme (lutita).

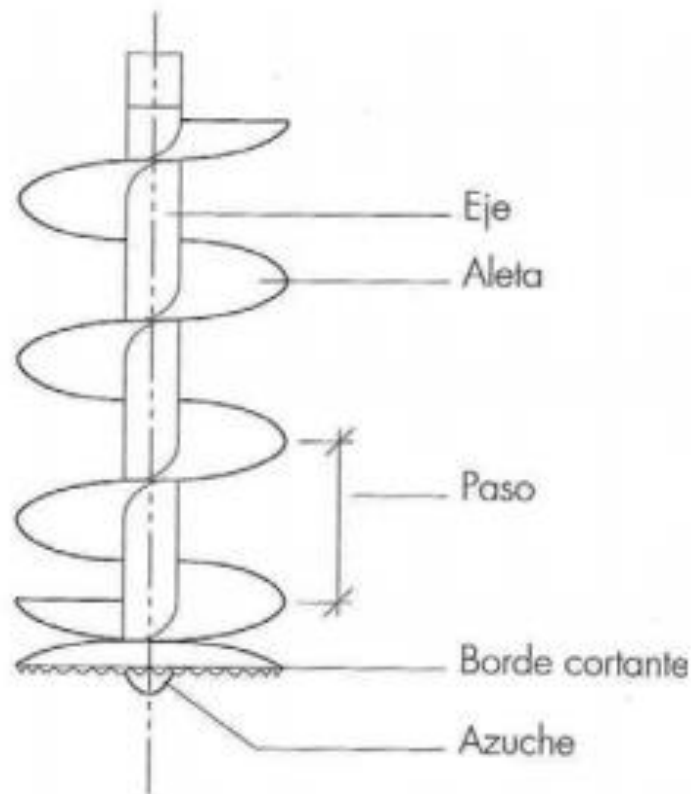


Gráfico 2-4 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE PERFORACIÓN CON BARRENA CONTINUA
Fuente: (Daniel Gómez García, 2010)

Para garantizar una correcta ejecución del pilote se deben realizar los siguientes controles:

- Control de la continuidad a lo largo del fuste del pilote.
- Control permanente del consumo de hormigón.
- Control de la presión durante el hormigonado.
- Registro del tiempo real de perforación.
- Registro del tiempo real de hormigonado.

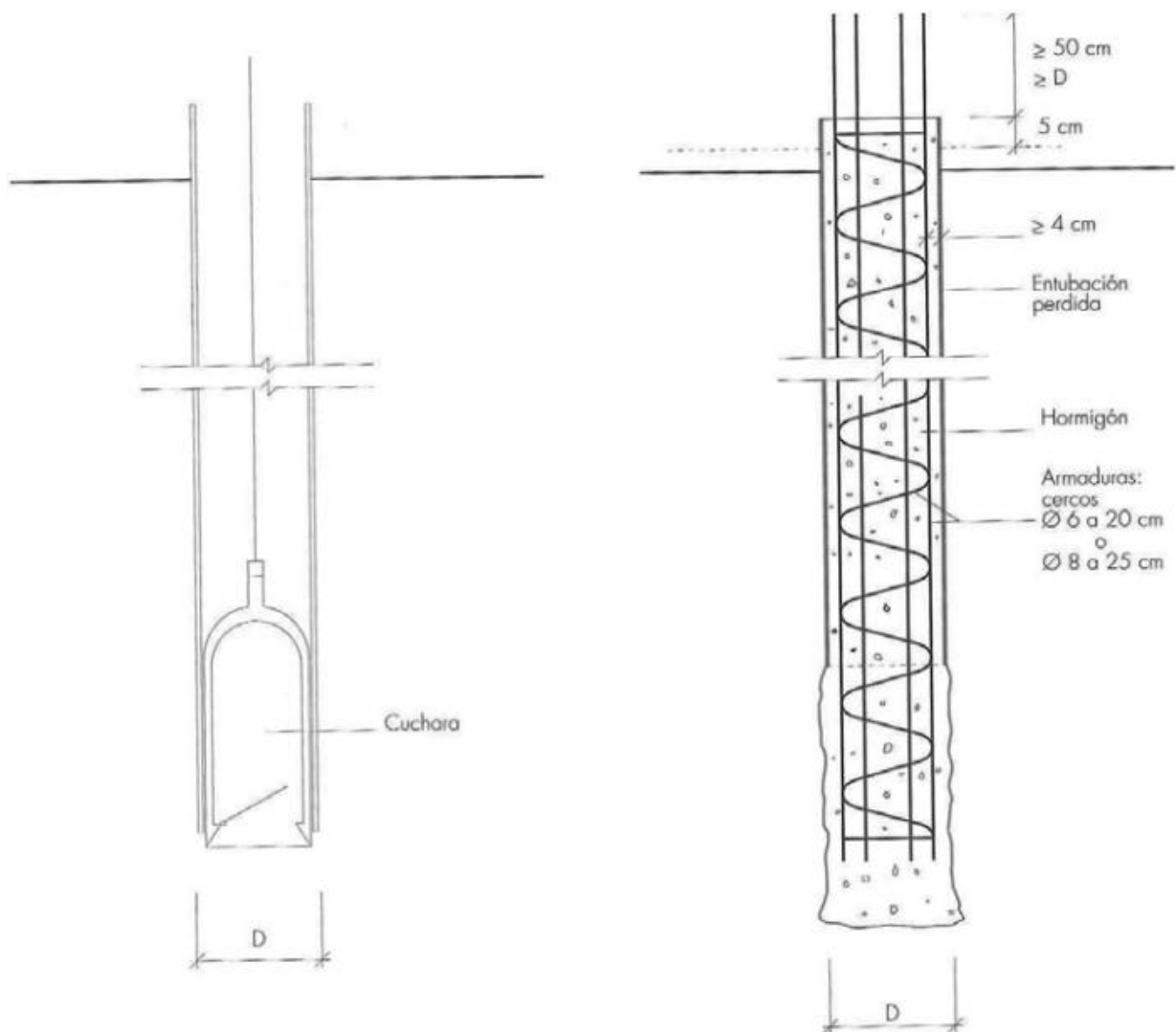


Gráfico 2-5 PILOTES PERFORADOS CON CAMISA PÉRDIDA
 Fuente: (Daniel Gómez García, 2010)

2.1.2 ANOMALÍAS, FALLOS Y DEFECTOS EN LOS PILOTES

Una anomalía es aquella desviación de la forma normal del registro Gráfico del ensayo que implica la presencia de un fallo o un defecto físico en el pilote. El técnico responsable del ensayo debe evitar la presencia de anomalías producto de una mala instrumentación o una deficiente preparación o calidad del ensayo.

Un fallo es una irregularidad observada en los registros obtenidos que físicamente se puede evidenciar como variaciones con respecto a lo previsto en cuanto a la geometría o al material constitutivo del pilote, pero que por su tamaño o localización no afectan a la capacidad portante del elemento.

Un defecto es un fallo que por su magnitud o ubicación puede llegar a reducir la capacidad resistente del pilote o su durabilidad.

Definir las causas que han producido los defectos en los pilotes sería sencillo si conociéramos las incidencias durante el proceso constructivo especialmente durante la etapa de perforación y de hormigonado, por lo que para facilitar la deducción Michael W. O'Neill en "Construction Practices and Defects in Drilled Shafts" (1991) ha clasificado a los defectos por las causas que los producen de la siguiente manera:

a) Defectos debido a problemas constructivos:

Rotura o corte plano.- Generalmente ocurren en la cabeza del elemento debido al desplazamiento inadecuado de maquinaria pesada, especialmente debido a la maquinaria de pilotar, o a un incorrecto descabezado de los pilotes; sobre todo, si no existe armadura en la cabeza del elemento.

Aunque estas discontinuidades también se pueden presentar en cualquier sección del fuste del pilote, causadas por la presencia de grandes esfuerzos laterales, por la aparición de zonas de tracción durante o posterior al hormigonado del elemento, por un deslavado del hormigón debido a flujos de agua altos o por una incorrecta manipulación del tubo tremie. Sin embargo, en los pilotes barrenados al utilizar en lugar del tubo tremie, un tubo central continuo para el hormigonado del pilote, se reduce en cierta medida el riesgo de aparición de este defecto.



Gráfico 2-6 DEFECTO DE ROTURA O CORTE EN UN PILOTE
Fuente: (CEDEX, 2008)

Exudación del concreto.- Causada por un lavado de finos durante la ejecución del hormigonado del pilote, ante la presencia de agua almacenada en la base de la perforación.

Inclusiones del material del terreno.- Es posible que se genere desmoronamiento de las paredes durante el hincado de la armadura, el cual se realiza posteriormente al hormigonado de un pilote perforado con barrena continua.

b) Defectos debido a problemas en la excavación:

Ensanchamientos.- Ocurren por un desmoronamiento de las paredes que provoca un aumento en la sección del pilote a ejecutar, este desprendimiento depende del entorno geotécnico que rodea al elemento o de una inadecuada contención de las paredes. Este defecto no se presenta en pilotes ejecutados con entubación recuperable o perdida.



Gráfico 2-7 DEFECTO DE ENSANCHAMIENTO EN UN PILOTE
Fuente: (CEDEX, 2008)

Inclusiones del material del terreno.- Es probable que se produzca un desprendimiento de las paredes durante el hormigonado de pilotes en seco, dentro de terrenos arcillosos con intercalaciones de estratos de arena.

c) Defectos debido a una incorrecta manipulación de la camisa:

Inclusiones del material del terreno.- El desmoronamiento de las paredes debido a una inapropiada extracción de la camisa durante el hormigonado de un pilote perforado mediante trépano que se encuentra bajo el nivel freático, provocara inclusiones débiles en el elemento.

La forma correcta de realizar la extracción de la camisa es elevándola mientras se va realizando el hormigonado del elemento, cada vez que se ejecute el hormigonado en una altura de dos veces el diámetro del pilote se elevara la entubación en la misma proporción, lo que evitara el desprendimiento del suelo circundante.

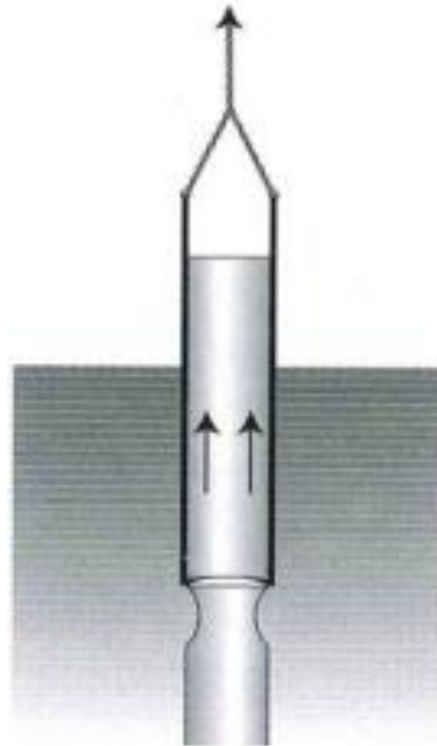


Gráfico 2-8 DEFECTO DEBIDO A UNA INCORRECTA EXTRACCIÓN DE LA CAMISA
Fuente: (CEDEX, 2008)

Rotura o corte plano.- Puede ser provocado por una inadecuada extracción de la camisa especialmente en aquellos pilotes de gran diámetro que se construyen mediante un modelo pila-pilote.

Deslavado del hormigón.- Es muy frecuente en pilotes con entubación recuperable que se encuentran introducidos dentro de suelos aluviales y dispuestos bajo la cota de nivel freático, puesto que debido al flujo de agua durante la extracción de la camisa, el elemento se vuelve susceptible al deslavado de su hormigón fresco.

Estrechamientos.- Es muy común en los pilotes con entubación recuperable cuya superficie es rugosa por lo que arrastra hormigón fresco durante su extracción, sobre todo, si existe un falso fraguado en la periferia del pilote.

Este defecto también se puede producir si la excavación se va avanzando por delante de la introducción de la camisa recuperable, provocando un desmoronamiento de las paredes que permitiría la entrada de agua al momento de la extracción de la camisa, ocasionando una estricción en la sección del elemento, tal como se indica en el Gráfico 1-12.

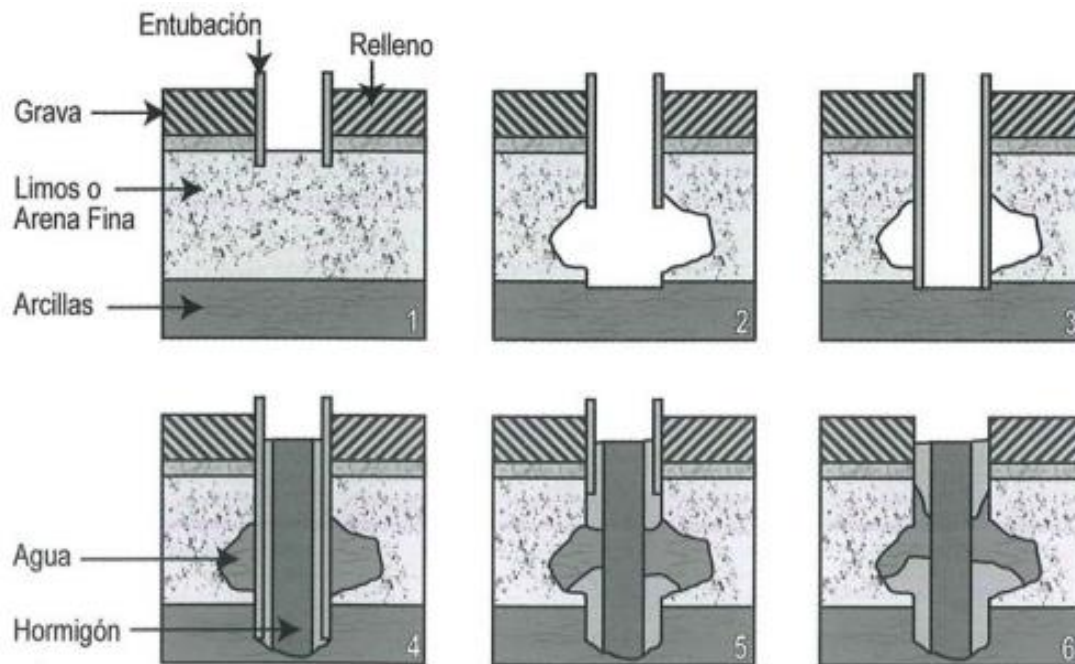


Gráfico 2-9 DEFECTO EN UN PILOTE CONSTRUIDO CON CAMISA RECUPERABLE
Fuente: (CEDEX, 2008)

d) Defectos provocados por una incorrecta aplicación de lodos bentoníticos:

Estrechamientos.- Estos defectos ocasionados por lodos de bentonita se producen si se utiliza un hormigón poco fluido, para la ejecución de un pilote cuya contención del terreno se realiza mediante lodos bentoníticos con alto contenido de arena.

Inclusiones del material del terreno.- Pueden ocurrir por un uso inapropiado de lodos bentoníticos que no aseguran la adecuada contención de las paredes de la perforación.

e) Defectos relacionados con el hormigonado del pilote:

Desprendimientos de hormigón fresco.- Los defectos mencionados pueden ser provocados por un falso fraguado en la periferia del pilote, por falta de recubrimiento de la armadura del elemento o debido a una baja trabajabilidad del hormigón, y pueden afectar a largo plazo el comportamiento del pilote especialmente si este trabaja a flexión.

Vacíos o coqueras.- La presencia de vacíos en el hormigón que compone el pilote genera una discontinuidad en la sección del elemento provocados generalmente por un suministro irregular de hormigón, por una pérdida de su fluidez durante la etapa de hormigonado, por una segregación del hormigón vertido o por un manejo inadecuado del tubo tremie, que pueden ser detectados a través del ensayo en función del espesor y posición de las ondas.

Deficiencias en las propiedades internas del hormigón.- Provocadas generalmente por una mala condición del hormigón debido a una degradación del mismo que pudo ser inducida por un ataque químico de un factor externo o por incidencias durante la ejecución del hormigonado del pilote.



Gráfico 2-10 DEFICIENCIAS EN LA CONDICIÓN DEL HORMIGÓN
Fuente: (CEDEX, 2008)

2.1.3 NORMATIVA SOBRE PILOTES

2.1.3.1 NORMATIVA ACI SOBRE PILOTES

Un diseño adecuado de la cimentación de una estructura permite garantizar que la respuesta inelástica ante fuertes movimientos del terreno se genere en sectores por encima del nivel de cimentación, porque de lo contrario la reparación de una cimentación puede resultar muy costosa y a la vez muy difícil.

El Reglamento de concreto estructural (ACI 318S-14) estipula que el sistema de cimentación profunda de la Grafica 1-12 puede ser diseñado mediante un modelo tridimensional puntal-tensor, considerando que no se puede utilizar hormigón simple en el encepado de los pilotes.

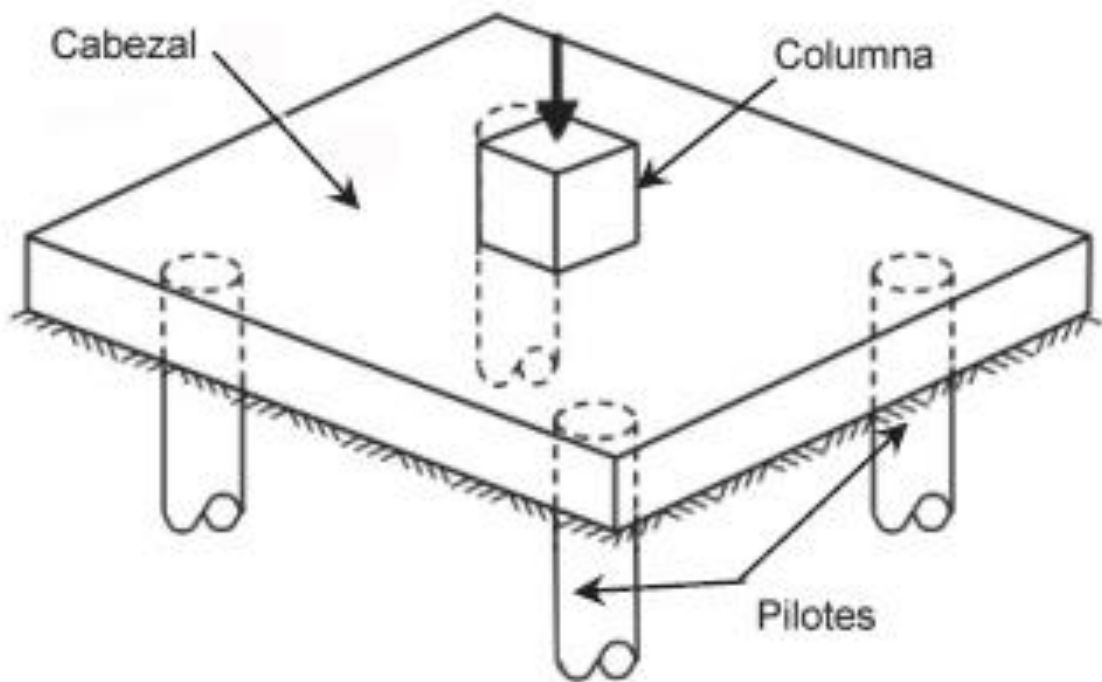


Gráfico 2-11 SISTEMA DE CIMENTACIÓN PROFUNDA CON PILOTES Y CABEZALES DE PILOTES
Fuente: (ACI 318S, 2014)

Los pilotes que han sido diseñados para resistir fuerzas de tracción que han sido inducidas por los efectos sísmicos, tienen que poseer refuerzo longitudinal continuo en las zonas que resistirán estas fuerzas.

Los pilotes necesariamente deben poseer refuerzo transversal que proporcione un comportamiento dúctil, el cual se deberá colocar en las siguientes zonas:

- La parte superior del elemento a una distancia no menor a 1.8 m o cinco veces su dimensión transversal, medida desde el nivel inferior del cabezal del pilote.
- La sección del pilote que se encuentre en el agua, en el aire o en un terreno que no le brinde suficiente apoyo lateral para evitar la falla por pandeo.

Durante un movimiento sísmico los pilotes pueden encontrarse sometidos a grandes demandas de flexión, principalmente en los puntos de discontinuidad, como ocurre debajo del cabezal de los pilotes o cerca del nivel inferior de un estrato de suelo suelto o blando.

Cuando existen cambios bruscos de los depósitos o estratos de suelo, de blando a firme o de suelto a denso, se puede producir una acción inelástica en el elemento pilote.

2.1.3.2 NORMATIVA NEC-2015 SOBRE PILOTES

La Norma Ecuatoriana de la Construcción considera como cimentación profunda a aquella unidad de obra que cumpla con la siguiente relación:

$$\frac{Df}{B} > 4$$

B = ancho de la unidad de obra de cimentación.

Df = profundidad de desplante de la unidad de obra de cimentación.

La interacción suelo-estructura está relacionada directamente con los efectos inerciales que comprometen el comportamiento de la estructura como resultado de las cargas transmitidas por la superestructura, tales como variaciones de su periodo fundamental de vibración, de su capacidad de amortiguamiento e incluso de su ductilidad; y con los efectos cinemáticos que afectan el comportamiento de la cimentación como resultado de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, tal como variaciones en la disipación de la energía producto de las altas frecuencias de excitación. Estos efectos pueden afectar a las estructuras que poseen un mayor grado de flexibilidad al no tener empotramiento fijo en su base.

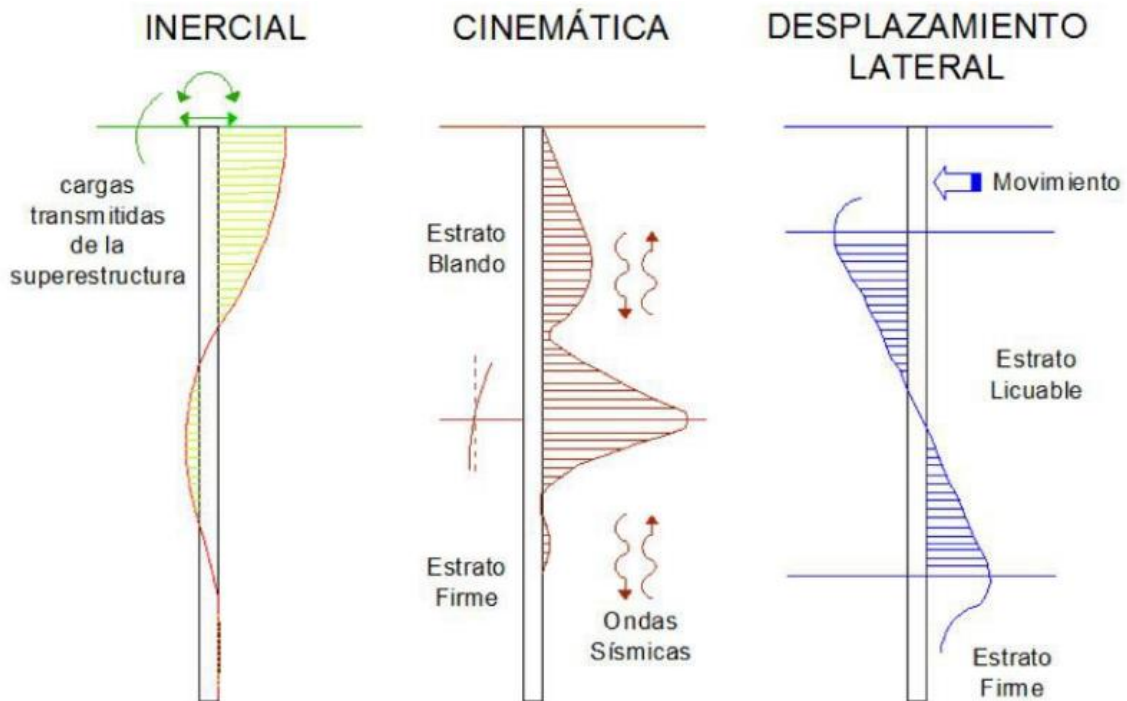


Gráfico 2-12 MECANISMOS DE INTERACCIÓN SÍSMICA SUELO PILOTE
Fuente: (NEC, 2015)

La interacción suelo-pilote-superestructura está caracterizada por la relación existente entre el periodo de la estructura (T_e) y el periodo del subsuelo (T_s).

Para evaluar la interacción cinemática en el sistema suelo-pilote-cabezal, se recomienda utilizar el Método de deformación sísmica (SDM) estipulado en la Norma de diseño sísmico japonés para facilidades ferroviarias (1996), o idealizar sus efectos a través de un perfil de deformación estática del suelo en el fondo del pilote.

Para el análisis de la interacción inercial en el sistema suelo-pilote-cabezal, se indica que se debe realizar un modelo pseudoestático que represente las fuerzas inerciales en el cabezal de los pilotes provenientes de la estructura.

Para suelos blandos determinados según la Norma Ecuatoriana de la Construcción como suelos tipo E y F, tal como las arcillas expansivas en donde las estructuras deben cimentarse a una profundidad en donde no exista variación en la humedad del terreno, es necesario realizar el análisis de interacción inercial y el análisis de interacción cinemática, para considerar las deformaciones que producirán mayores esfuerzos en los pilotes.

Se recomienda en este tipo de suelos realizar un análisis de la estabilidad sísmica que presenta el subsuelo, para evaluar los efectos de degradación cíclica y licuación que pueden afectar a la estructura, tales como asentamientos del suelo que pueden producir una fricción negativa en el pilote provocando problemas especialmente en los pilotes de fricción, puesto que generan un aumento de la carga transmitida y una disminución en la capacidad de carga del elemento, lo que obliga a una reducción del factor de seguridad estático.

En el pilote también se debe analizar su comportamiento ante las distintas sollicitaciones sísmicas que se puedan presentar, producto de la carga sísmica sobre el suelo en contacto y de la carga sísmica horizontal de la estructura, para garantizar que los desplazamientos laterales se encuentren dentro de los admisibles y que no exista momento de volcamiento sísmico ni giro de la cimentación por la actuación de la fuerza cortante.

2.2 MÉTODO SÓNICO

El ensayo sónico es un ensayo de integridad estructural que produce una baja deformación en la cabeza del pilote y al no requerir la utilización de equipo pesado permite un alto rendimiento en el número de pilotes ensayados. Este ensayo permite controlar pilotes u otros elementos estructurales siempre que la geometría sea cilíndrica o prismática.

Este método se basa en el análisis de la respuesta dinámica provocada por una pequeña fuerza axial de corta duración, que se aplica en la cabeza del pilote mediante un martillo de mano. La respuesta del sensor que mide la velocidad de vibración generada por el impacto del martillo de mano en la cabeza del pilote, se evalúa en el dominio del tiempo.

En la siguiente tabla se muestra las características de los ensayos sónicos de integridad estructural comparándolas con las de los ensayos estáticos y dinámicos de carga:

ENSAYOS	SÓNICOS	DINÁMICOS	SEMIESTÁTICOS	ESTÁTICOS
Masa martillo	0.5 – 5 Kg	2000 – 10000 Kg	2000 – 5000 Kg	N/A
Deformación máxima en pilote	$2 - 10 \times 10^{-6}$	$500 - 1000 \times 10^{-6}$	1000×10^{-6}	1000×10^{-6}
Velocidad máxima en pilote	10 - 40 mm/s	2000 - 4000 mm/s	500 mm/s	10^{-3} mm/s
Fuerza máxima	2 – 20 KN	2000 – 10000 KN	2000 – 10000 KN	2000 - 10000 KN
Duración de la fuerza	0.5 – 2 ms	5 – 20 ms	50 – 200 ms	10^7 ms
Aceleración del pilote	50 g	500 g	0.5 – 1 g	10^{-14} g
Desplazamiento del pilote	0.01 mm	10 – 30 mm	50 mm	> 20 mm

Tabla 2-1 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS ENSAYOS EN PILOTES

Fuente: (CFT, 2000)

Elaborado por: Josué Zumba, Abril 2017

Las principales diferencias entre los métodos de Impedancia Mecánica y Eco, son las que se indican a continuación:

Método	Eco	Impedancia Mecánica
Martillo instrumentado	NO	SI
Dominio de base para la interpretación de resultados	Tiempo	Frecuencia
Normativa de referencia	ASTM D5882-16	ASTM D5882-16
Sensor	Velocidad/Aceleración	Velocidad/Aceleración y Fuerza

Tabla 2-2 DIFERENCIAS ENTRE LOS MÉTODOS DE IMPEDANCIA MECANICA Y ECO

Fuente: (CEDEX, 2008)

Elaborado por: Josué Zumba, Abril 2017

Entre las ventajas que presentan los ensayos de Eco e Impedancia Mecánica, al contrario que la Transparencia Sónica, está la de que no requieren una instrumentación previa del pilote. Solo se precisa que el pilote este descabezado y que se prepare adecuadamente la cabeza en función del ensayo a realizar.

2.2.1 INSTRUMENTACIÓN

Los equipos necesarios para la realización del ensayo sónico o ensayo de eco son: el sensor de medida de la vibración (acelerómetro), el martillo de mano y el equipo de registro, acondicionamiento y análisis de la señal.

Los sensores utilizados para registrar la respuesta en la cabeza del pilote, deben presentar un buen contacto con el elemento a auscultar y generalmente para este tipo de ensayos se utiliza un acelerómetro piezoeléctrico. La Norma ASTM D5882-16 indica que los acelerómetros tendrán que tener una respuesta lineal hasta 200 g e indica también que tendrán frecuencias de resonancia de al menos 30 kHz.

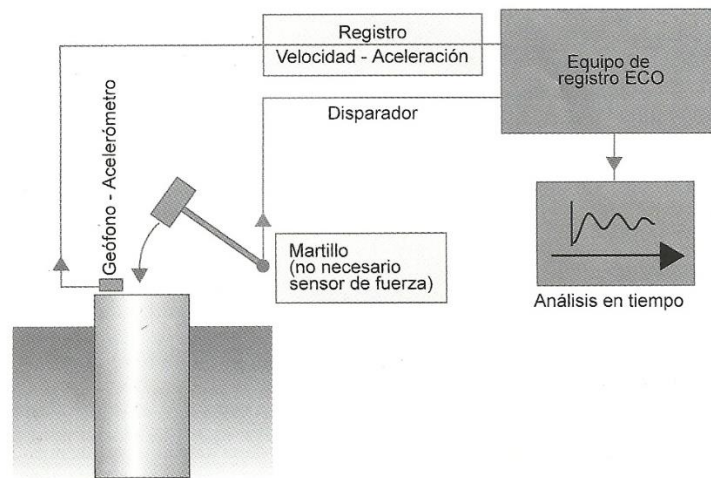


Gráfico 2-13 ESQUEMA GENERAL DE LA TÉCNICA DE ECO
Fuente: (CEDEX, 2008)

La capacidad del sistema para diferenciar la señal más pequeña posible (fondo del pilote) en comparación con la señal generada (impacto en la cabeza), es decir, la aptitud para detectar pequeñas anomalías es lo más importante del equipo de registro, acondicionamiento y análisis de la señal. No se debe olvidar que una zona de heterogeneidad plana de poco espesor en el fuste puede tener mucha importancia en la integridad estructural del pilote, en especial si este además es de poca longitud.

Al utilizar la velocidad de propagación de las ondas elásticas en el hormigón, la precisión en el cálculo de la longitud del pilote será función de la resolución en el tiempo. Una baja resolución puede llevar en casos extremos a producir malas interpretaciones. Por ejemplo, puede ocurrir que se refleje una reducción de sección significativa que oculte cortes completos de sección próximos por debajo. Si la resolución no es buena, la interpretación no permitirá detectar este corte inferior que puede afectar tan claramente al elemento.

2.2.2 EJECUCIÓN DEL ENSAYO

Para la ejecución del ensayo primero se debe realizar la preparación del pilote, el cual debe encontrarse descabezado, sin presencia de agua y suciedad en la cabeza del mismo, permitiendo que el golpe del martillo se realice sobre hormigón sano y no sobre discontinuidades, fisuras o coqueas de un hormigón poco compacto, que lleguen a reflejarse en el gráfico de la onda causando una incorrecta interpretación.

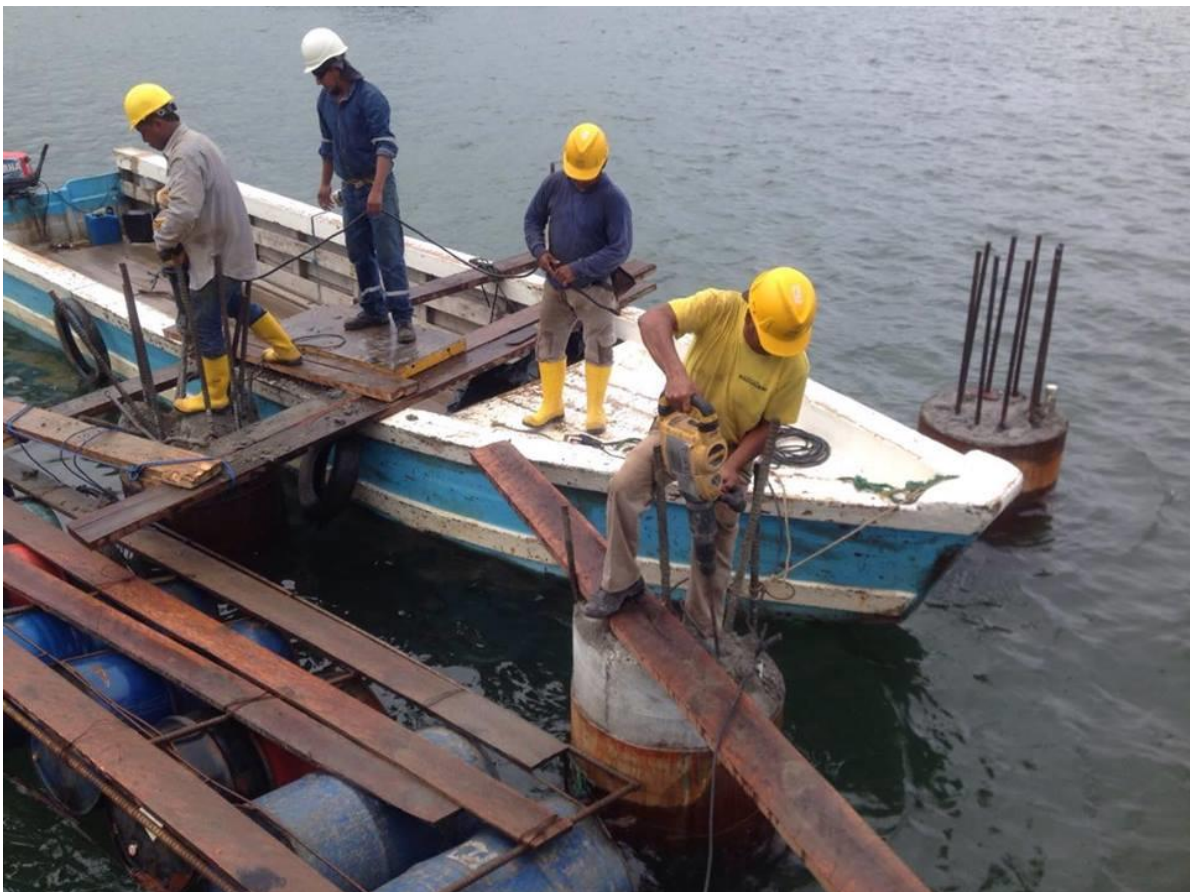


Gráfico 2-14 DESCABEZADO DE PILOTE EN PUENTE PEATONAL DE MUISNE
Fuente: (Josué Zumba, 2016)

La preparación más apropiada de la cabeza del pilote para el ensayo de integridad estructural según Fernández Tadeo en “Técnicas modernas para el ensayo de pilotes y cimentaciones profundas” (2000), es la siguiente:

- Si es posible, los pilotes deben ser ensayados descabezados a la misma cota que la prevista de encepado y en el hormigón sano. El hormigón de mala calidad o fisurado y que suene hueco deberá eliminarse dejando la superficie horizontal.
- Las armaduras deben apartarse, en la medida de lo posible, quitando los cercos, para permitir que haya espacio donde golpear con el martillo y que no se golpeen las barras produciendo vibraciones.
- Se tienen que preparar dos superficies, una para el martillo en el centro del pilote y otra excéntrica para el acelerómetro. Estas superficies deben tener unos 10 cm de diámetro y habrá que prepararlas lo más lisas posible usando una amoladora y dejándolas limpias de polvo, ya que de ello depende que se pueda producir un impacto con tiempo de contacto lo mínimo posible, que permita que la señal reflejada sea la más adecuada posible.
- El acelerómetro tiene que estar bien adherido al hormigón mediante una grasa de silicona o material de baja impedancia acústica, este se colocara próximo a las armaduras en su interior, y se golpeará en el centro del pilote con el martillo de mano de aproximadamente un kilo de peso. Para pilotes de gran diámetro es conveniente colocar el sensor en varios puntos de la cabeza del pilote.
- Evitar hacer superficies con morteros adheridos al hormigón en cabeza para colocar el sensor, ya que una mala adherencia puede provocar despegues del sensor y ruidos erráticos.
- Evitar que el hormigón de limpieza del encepado este en contacto con el pilote a ensayar, ya que la movilización de la cabeza del pilote con el impacto no será la adecuada.

El ensayo se lo realiza con un martillo de mano con el cual se da un golpe en la cabeza del pilote generando una onda de compresión de pequeña amplitud que recorre a lo largo del fuste y es reflejada por la punta del pilote, por la presencia de discontinuidades en el fuste, por cambios en la sección transversal del pilote o por variaciones del terreno que lo rodea, para ser captada por un acelerómetro que se encuentra en la cabeza del mismo.

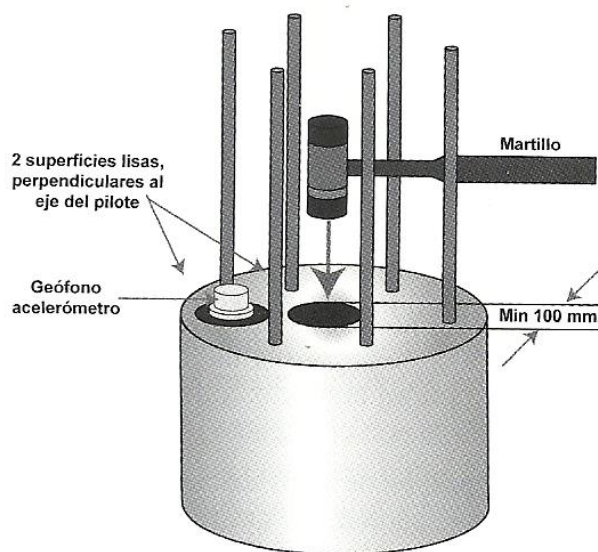


Gráfico 2-15 PREPARACIÓN DE LA CABEZA DEL PILOTE
Fuente: (CEDEX, 2008)

No se puede realizar el ensayo sónico si los encepados o vigas de atado ya han sido hormigonados, por lo que no conviene construir los encepados hasta que se confirme mediante los resultados del ensayo que los pilotes carecen de defectos.

Para evitar señales con ruidos erráticos, será necesario prestar atención a que los ensayos no se realicen en momentos de vibración de máquinas compactadoras próximas o martillos compresores descabezando, ya que se producen ruidos que afectan sobre todo a la valoración de la rigidez del pilote.

La señal que es captada por un acelerómetro conectado a un computador, es digitalizada, amplificada y transformada en medida de velocidad, por un software que nos permite realizar la interpretación del ensayo a través de un gráfico que representa la curva media de la trayectoria de la onda generada por varios impactos del martillo de mano, la visualización del Gráfico nos indica el momento de dejar de golpear la cabeza del pilote al ya no existir variaciones en la curva que se ha obtenido.

Una recomendación para este tipo de ensayos que se presenta tanto en la normativa inglesa, como en la francesa y en la norteamericana, es que conviene realizar el ensayo cuando el hormigón tenga al menos entre cinco o siete días de edad o haya alcanzado una resistencia a compresión de al menos el 75% de la de proyecto.

Para estimar la velocidad de propagación de la onda en el hormigón, Amir en “Pile integrity testing” (1998), estableció una curva para estimar dicha velocidad en función de la edad del hormigón y su resistencia a la compresión.

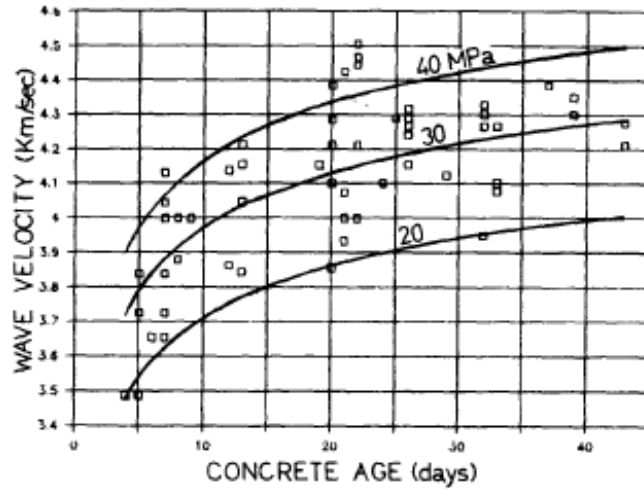


Gráfico 2-16 VELOCIDAD DE LA ONDA EN UN CILINDRO DE HORMIGÓN EN FUNCIÓN DE SU EDAD Y SU RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN
Fuente: (AMIR, 1998)



Gráfico 2-17 EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE ECO
Fuente: (Josué Zumba, 2016)

Para definir el número de pilotes que se van a ensayar, según Fernández Tadeo en “Técnicas modernas para el ensayo de pilotes y cimentaciones profundas” (2000) deberíamos tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Condiciones geotécnicas del suelo.
- El tamaño del pilote (diámetro y profundidad).
- El tipo de pilote (en seco, con camisa, con lodos, perforado, barrenado, etc.).
- La disposición de los pilotes en el encepado, en grupo o individual.
- El tipo de cargas que soportara la cimentación y las condiciones de diseño (resistencia por fuste, punta o ambas).
- Dificultades constructivas.
- Presencia de aguas subterráneas complejas.
- La experiencia y maquinaria de que dispone la empresa de cimentación.

El Ministerio de Transporte Francés en la publicación “Pieux fores recueil des regles de l’art” (1978) indica el número de pilotes a ensayar para obras civiles en función del número de pilotes de que consta la obra, de la forma de trabajo del pilote y del número de pilotes por encepado (en grupos mayores o menores de cuatro) según se indica en la siguiente tabla:

Forma de trabajo del pilote	Número total de pilotes	Porcentaje a ensayar	
		Cuatro o menos pilotes por encepado	Más de cuatro pilotes por encepado
Fuste	≤ 50	100 %	Entre 50 y 100 %
Fuste	> 50	100 %	Entre 50 y 100 %
Fuste y punta	≤ 50	100 %	Entre 50 y 100 %
Fuste y punta	> 50	Entre 50 y 100 %	Entre 50 y 100 %
Punta	≤ 50	100 %	Entre 50 y 100 %
Punta	> 50	Entre 50 y 100 %	Entre 50 y 100 %

Tabla 2-3 PORCENTAJE DE PILOTES A ENSAYAR

Fuente: (Ministerio de Transporte Francés, 1994)

Elaborado por: Josué Zumba, Abril 2017

Si se pretende ensayar una parte del conjunto de pilotes y se comienza a detectar defectos en los pilotes ensayados, resultara necesario auscultar el resto de pilotes.

El gráfico de velocidad de propagación de la onda en función del tiempo de un pilote sano determinado por el software, estará representado por una línea recta con un pico en cada extremo de la gráfica, que representan en él un extremo el impacto causado por el martillo y en el otro la reflexión originada en la punta del pilote.

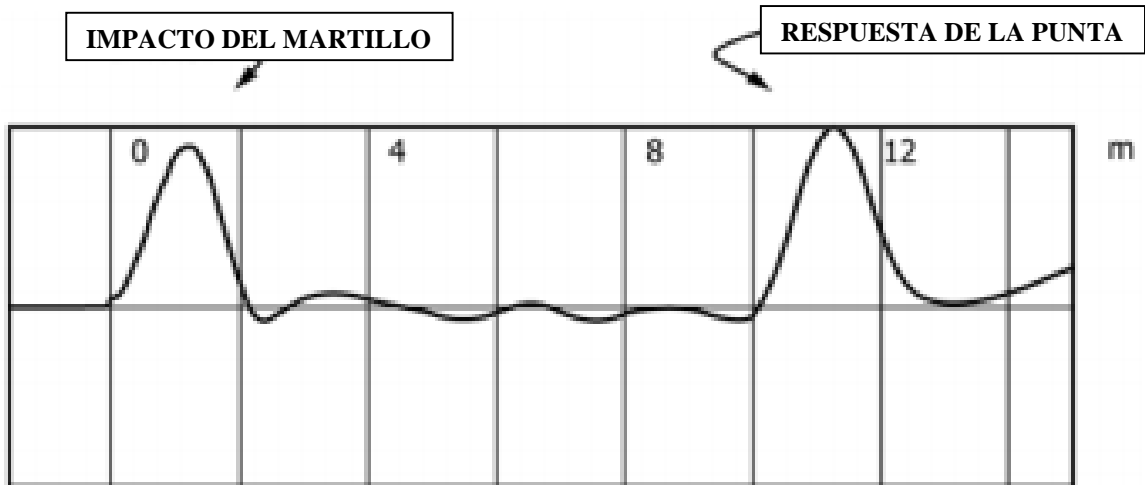


Gráfico 2-18 GRÁFICO DE VELOCIDAD DE UN PILOTE SANO
Fuente: (ASTM D5882, 2016)

En el caso de la existencia de coqueas, oquedades, vacíos, grietas, inclusiones de tierra u otras irregularidades presentes en el pilote, el gráfico de la trayectoria de la onda reflejará la extensión y la profundidad de la anomalía detectada.

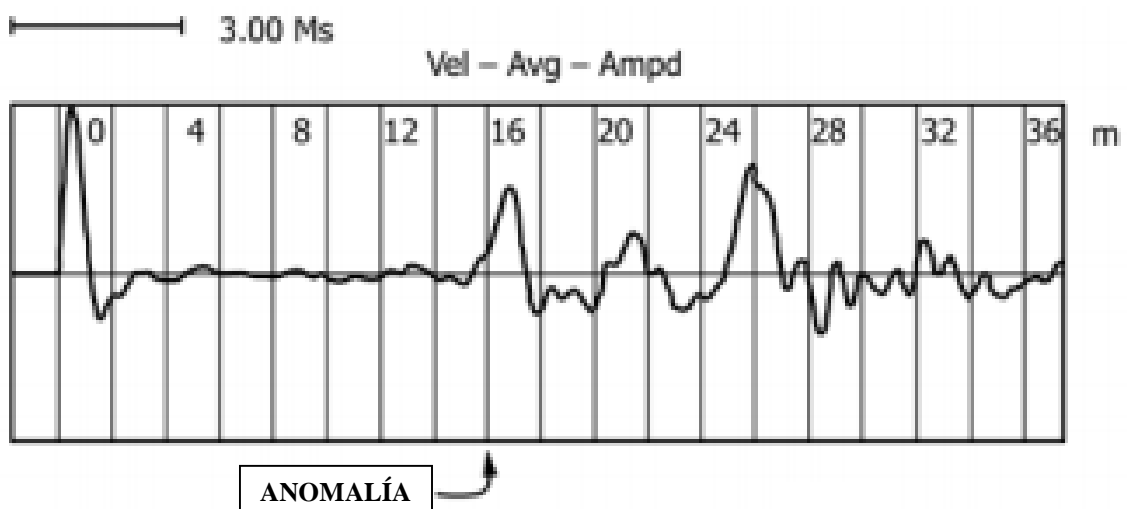


Gráfico 2-19 GRÁFICO DE VELOCIDAD DE UN PILOTE CON ANOMALÍA
Fuente: (ASTM D5882, 2016)

Las desventajas que presenta este ensayo según CEDEX en “Recomendaciones para la ejecución e interpretación de ensayos de integridad de pilotes y pantallas in situ” (2008) es que no se puede identificar la existencia de desvíos en la armadura que compone el pilote, no se puede comprobar la verticalidad del elemento, no proporciona información sobre la posición lateral de los defectos (si están en el centro o en la periferia) y entrega resultados distorsionados para elementos bidireccionales como las pantallas de hormigón. Realmente, incluso con estas limitaciones, son una buena herramienta para detectar defectos significativos y comprobar la longitud teórica de los pilotes de forma sencilla.

2.2.3 PRINCIPIO DEL MÉTODO SÓNICO

El impulso mecánico provocado por el impacto del martillo de mano genera un tren de ondas que se transmite a lo largo del pilote a una velocidad que dependerá de las características del material que constituye al elemento.

La velocidad de propagación de la onda elástica en el hormigón según CEDEX en “Recomendaciones para la ejecución e interpretación de ensayos de integridad de pilotes y pantallas in situ” (2008) se puede analizar como un frente de onda plano con valores entre 3500 – 4000 m/s y está dada por la siguiente expresión:

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

ρ = densidad del hormigón

E = módulo de elasticidad dinámico del hormigón

El método se fundamenta en la interpretación de la onda reflejada por cambios en la rigidez del terreno circundante, en la geometría del pilote o en las propiedades mecánicas del hormigón. Estos cambios físicos que incluyen variaciones en su área de sección transversal, en la velocidad de propagación de la onda, en la densidad o módulo de elasticidad del hormigón producen ecos que posibilitan evaluar la condición de integridad del pilote, a través de las siguientes fórmulas que consideran cada uno de estos términos:

$$z = \rho \times c \times A$$

z = impedancia de una sección del elemento pilote

c = velocidad de transmisión de la onda de compresión

A = área de sección transversal

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

E = módulo de elasticidad dinámico del hormigón

La admitancia característica del pilote (N) es el inverso de su impedancia característica:

$$N = \frac{1}{\rho \times c \times A}$$

El valor medido de la admitancia característica se puede comparar con su valor teórico para estimar la calidad del hormigón o determinar un aumento o disminución de sección.

En un pilote continuo dentro de un terreno homogéneo, el primer cambio registrado en la impedancia de la sección se genera por la reflexión del eco en la punta del pilote, el cual al alcanzar la cabeza del elemento habrá viajado una distancia de dos veces la longitud del mismo. El acelerómetro conectado al computador registrara el tiempo (t) que demora la onda en volver de recorrer el fuste del pilote desde el impacto generado por el martillo de mano, y conociendo la velocidad de propagación de la onda de compresión en el hormigón, es posible a través de estos dos parámetros calcular la longitud de empotramiento del pilote mediante la siguiente expresión:

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

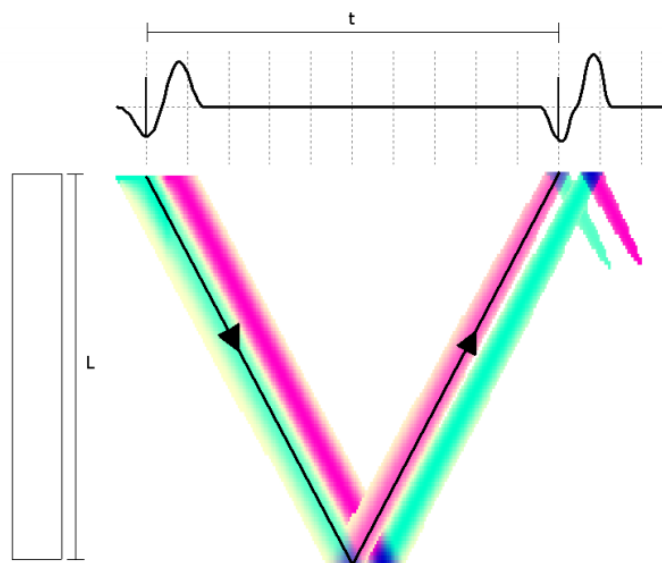


Gráfico 2-20 CURVA TEORICA PARA UN PILOTE SANO
Fuente: (Daniel Gómez García, 2010)

Si en el terreno circundante al pilote ensayado no existen cambios de rigidez entre sus estratos, es decir, el terreno es homogéneo, se puede registrar un cambio en la impedancia de la sección producto de variaciones en las propiedades del hormigón o de un brusco ensanchamiento o estrechamiento de su sección transversal en una profundidad (h), por lo que el acelerómetro en su registro de movimientos de la cabeza del pilote captara un primer reflejo de la onda en un tiempo (t'), y la profundidad (h) se la calculara así:

$$h = \frac{c \times t'}{2}$$

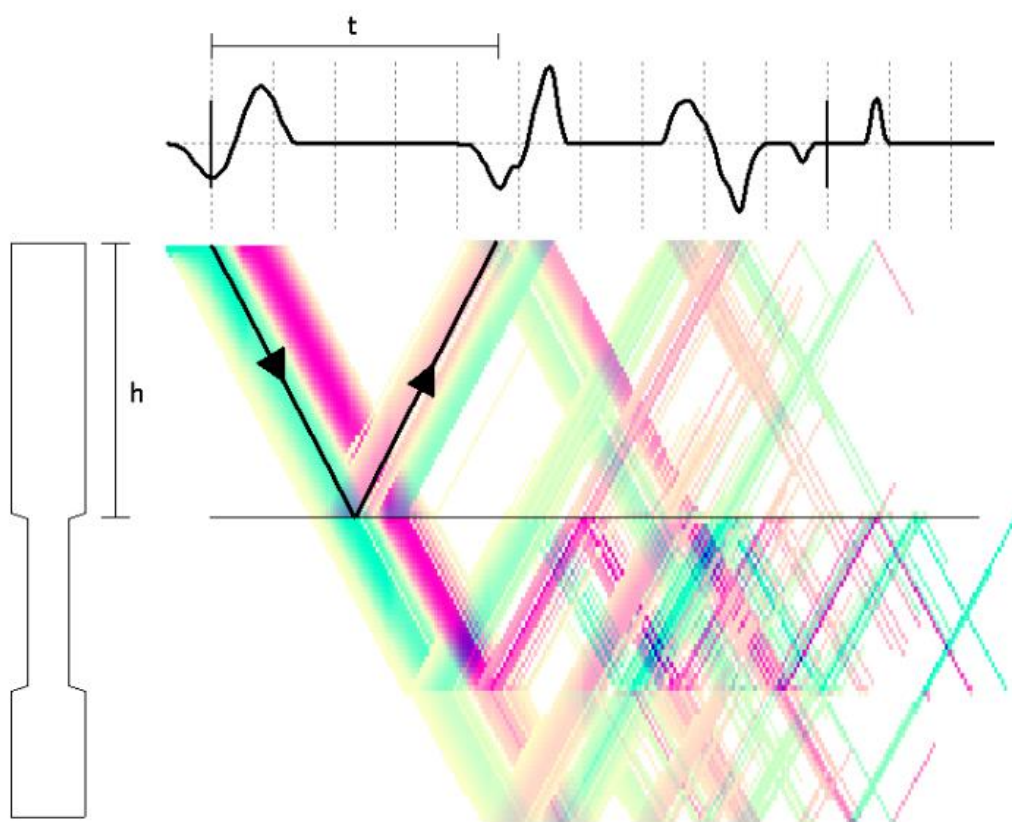


Gráfico 2-21 CURVA TEORICA PARA UN PILOTE CON ESTRECHAMIENTO
Fuente: (Daniel Gómez García, 2010)

Los defectos en punta según Fernández Tadeo en “Técnicas modernas para el ensayo de pilotes y cimentaciones profundas” (2000), son los defectos más comunes en los pilotes de hormigón armado construidos “in situ” con extracción, por lo que se debe realizar una adecuada interpretación del registro sónico de la punta del elemento para conocer el estado real del hormigón en punta, lo que permitirá garantizar que la condición de la punta no influirá en el comportamiento de la cimentación, especialmente, si el pilote trabaja por punta.

Los defectos en la punta del pilote generalmente suceden debido a un sifonamiento en el fondo de la excavación o a un deslavado del hormigón producto del agua acumulada en la base de la perforación, pero es más común que se produzcan por una falta de limpieza en el fondo de la perforación, o por la presencia de sedimentos en la base de la excavación que resultan imposible extraer utilizando un sistema de Air Lift u otros métodos de desarenado, sobre todo, en pilotes cuyas paredes son contenidas mediante lodos bentoníticos.

La dificultad del análisis de la 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, por ejemplo, si en el terreno existen capas rígidas intercaladas se pueden producir rebotes de la señal en estas capas dificultando la interpretación e incluso atenuando la señal lo que ocultaría la respuesta del fondo del pilote.

Muchas veces no se obtienen datos de toda la profundidad del pilote puesto que la señal de la onda se atenúa antes de llegar a la punta, debido a la disipación de la energía producida por el impacto del martillo de mano hacia el suelo circundante, que está influenciada por la relación entre la rigidez del pilote y la del terreno, es decir, por la relación entre la esbeltez del pilote y el entorno geotécnico que lo rodea. Amir en “Pile integrity testing” (1998) propone un gráfico para determinar la profundidad de investigación hasta la que puede considerarse como válido el estudio debido a la atenuación de la señal que puede impedir la visualización de la punta del elemento, en función de los parámetros de la esbeltez del pilote (longitud/diámetro) y del tipo y grado de compactación del suelo que lo rodea.

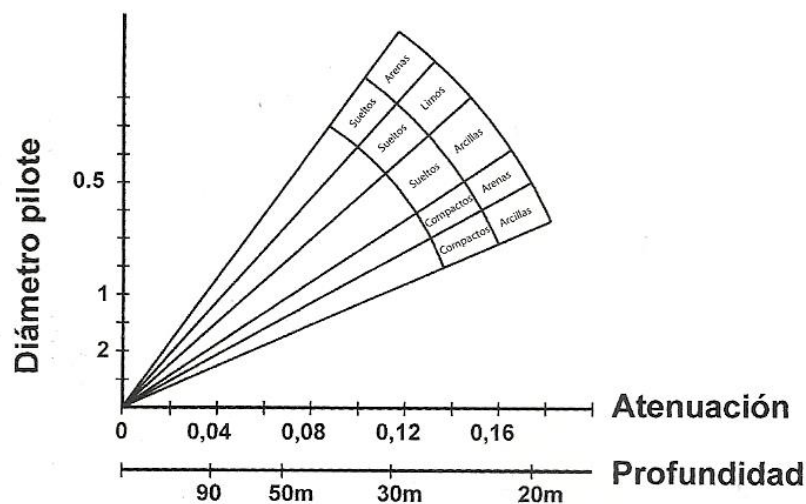


Gráfico 2-22 GRÁFICO DE ATENUACIÓN SEGÚN BRIARD
Fuente: (Amir, 1998)

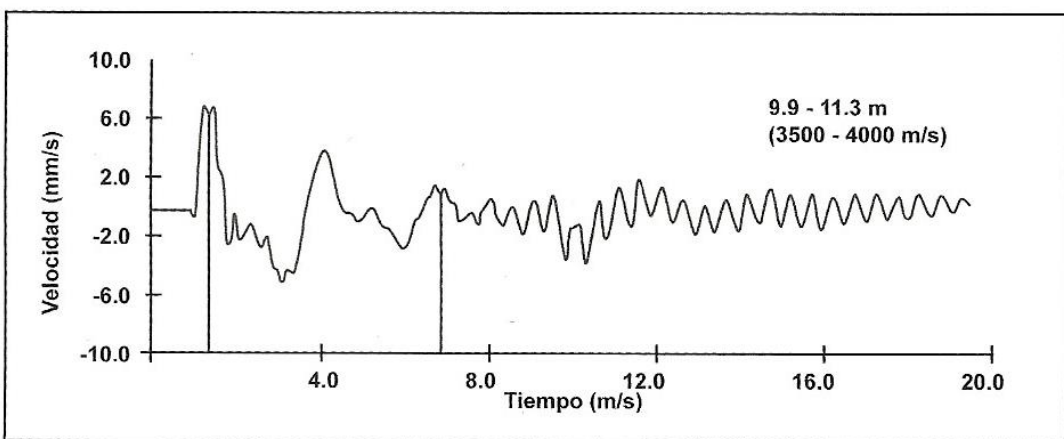
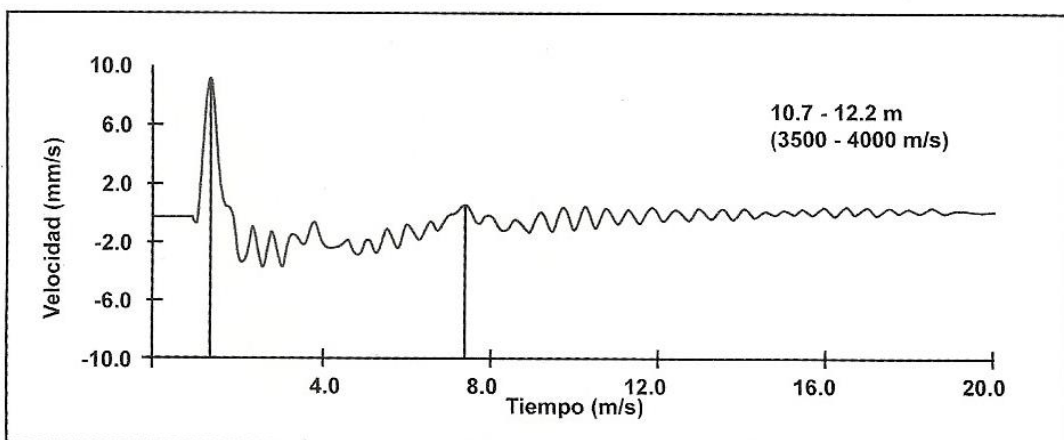
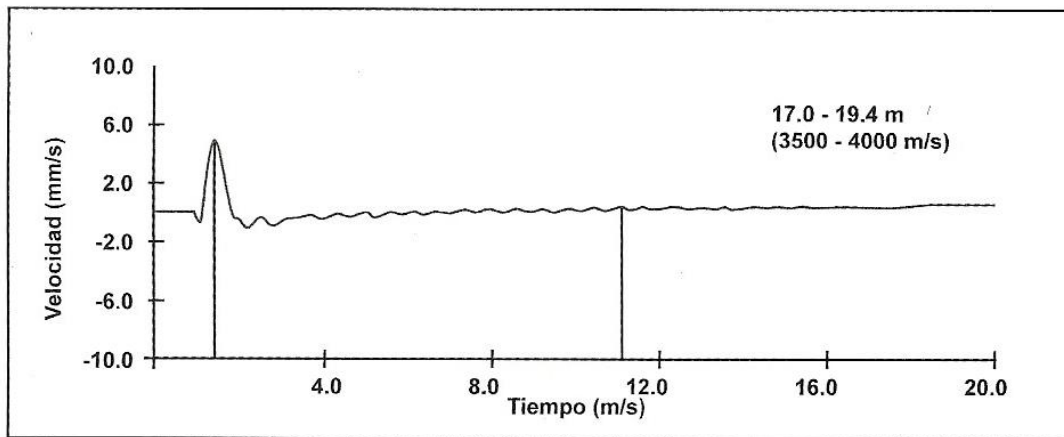


Gráfico 2-23 CURVAS REALES DE ECO EN SUELOS CON DISTINTA RIGIDEZ
Fuente: (CEDEX, 2008)

En el Gráfico 2-23 se muestran algunas curvas de Eco con la misma escala vertical en las que se observan reflexiones de la onda producto de terrenos con cambios de rigidez entre sus estratos, es decir, algún espesor de estrato tiene una velocidad de propagación de la onda de cizalla (onda S) mayor a la del resto del suelo circundante, por lo que esta capa con mayor rigidez interferirá en la señal de la onda ocultando completamente la punta del pilote.

Según Fernández Tadeo en “Técnicas modernas para el ensayo de pilotes y cimentaciones profundas” (2000), el problema radica en que no se puede obtener datos de profundidades superiores a 20 veces el diámetro del pilote en suelos rígidos tal como los terrenos arcillosos duros, en suelos blandos o sueltos no se logra información de profundidades mayores a 40 veces el diámetro del pilote y en suelos aluviales se pueden conseguir resultados hasta profundidades de 60 veces el diámetro del pilote.

Aunque la Normativa francesa considera como campo de aplicación de esta técnica esbelteces entre 10 y 30, y diámetros inferiores a 1 m, salvo si el pilote está en suelos blandos en los que se puede aumentar la esbeltez. Esta normativa descarta el uso de estos métodos para diámetros superiores a 1 m, sin embargo, se pueden obtener buenos resultados con suficiente resolución para diámetros muy superiores. Al igual que con la esbeltez del pilote la limitación en diámetro dependerá del entorno geotécnico en que se encuentre el pilote.

2.2.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Este método de auscultación permite evaluar pilotes de similares características en entornos geotécnicos parecidos, comparando su valor de rigidez dinámica y su admitancia característica que es aquella que relaciona la geometría del pilote y las propiedades mecánicas del hormigón.

En un pilote la rigidez depende fundamentalmente de su diámetro, de su longitud y de las propiedades del hormigón y del terreno que le rodea. En un mismo terreno, por tanto, pilotes del mismo diámetro y de longitudes similares suelen presentar rigidices muy parecidas. Si dentro de un grupo de pilotes, alguno de los pilotes presenta rigidices muy inferiores a las del resto puede ser indicativo de algún tipo de rotura. En algunas ocasiones en las que las curvas obtenidas pueden ser difíciles de interpretar, la valoración de la rigidez de varios pilotes en el conjunto de una obra puede ser de mucha utilidad para identificar pilotes que estén rotos en el entorno de la cabeza.

La admitancia característica según Fernández Tadeo en “Técnicas modernas para el ensayo de pilotes y cimentaciones profundas” (2000), al ser independiente de las propiedades del suelo es un indicador del comportamiento del pilote libre y del amortiguamiento provocado por el terreno que lo circunda. En general una admitancia característica baja frente a la teórica es un indicador de un ensanchamiento o bulbo y una admitancia alta de la presencia de un hormigón de mala calidad o una reducción de sección.

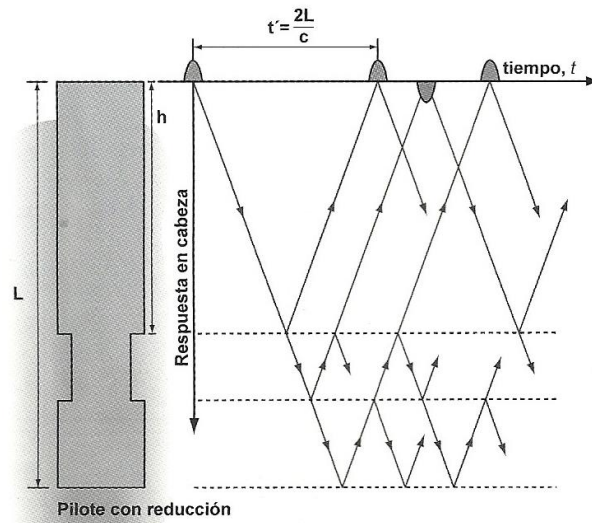


Gráfico 2-24 CURVA DE ECO TEÓRICA PARA PILOTE CON REDUCCIÓN DE SECCIÓN
Fuente: (CEDEX, 2008)

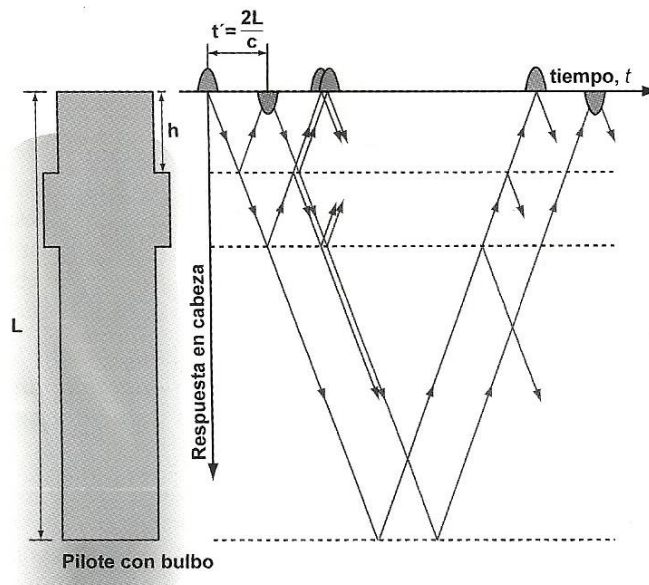


Gráfico 2-25 CURVA DE ECO TEÓRICA PARA PILOTE CON AUMENTO DE SECCIÓN
Fuente: (CEDEX, 2008)

Según CEDEX en “Recomendaciones para la interpretación y ejecución de ensayos de integridad de pilotes y pantallas in situ” (2008), la reacción pilote-suelo con el amortiguamiento y las variaciones en profundidad de las características del terreno dificultarían la interpretación de los cambios de impedancia en el pilote, puesto que variaciones en el módulo de corte del terreno del orden de 1:2 provocarían reflexiones parciales muy significativas y relaciones en el módulo de corte de 1:5 ocasionarían reflexiones totales, que se superpondrían a la señal propia del pilote por lo que no podría evaluarse el estado de integridad del elemento.

Según Daniel Gómez en “Estudios sobre ensayos de integridad estructural de pilotes” (2010), en un reflectograma ideal de un pilote continuo con empotramiento libre la curva inicial y final tendrán la misma polaridad, es decir, el sentido de ambas será hacia abajo. Lo mismo sucede en el caso de un estrechamiento del pilote puesto que se presenta una disminución de la sección transversal por donde recorren las ondas.

Al existir empotramiento libre en un pilote continuo, es decir, su comportamiento es flotante, la onda que genera el impacto del martillo será de compresión y la onda reflejada por la punta será de tensión, puesto que si se idealiza el pilote como una serie de partículas, estas recibirán una fuerza de compresión desde la cabeza del pilote hasta la partícula que representa la punta del pilote, y esta al no tener una partícula bajo la misma genera una fuerza de tracción hacia la partícula superior hasta llegar a la cabeza del elemento.

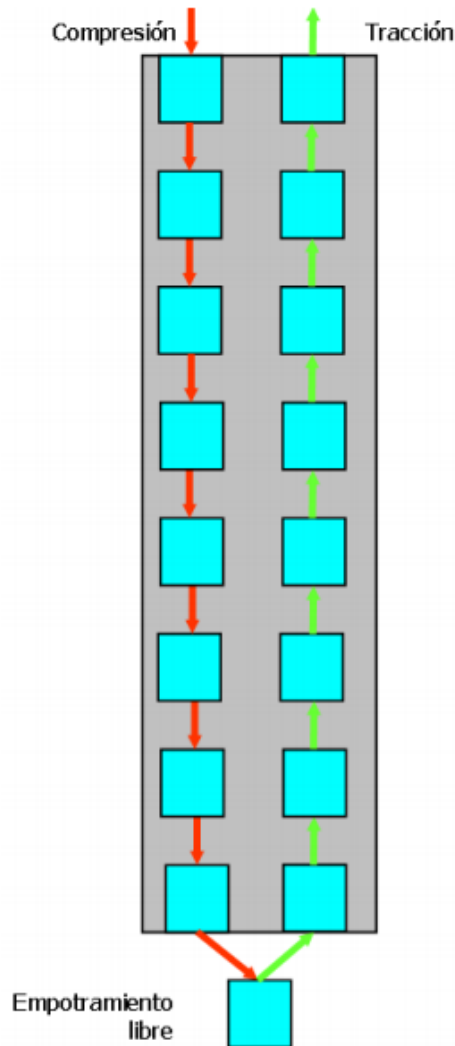


Gráfico 2-26 COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS DE UN PILOTE CONTINUO CON EMPOTRAMIENTO LIBRE
Fuente: (Daniel Gómez García, 2010)

Según CEDEX en “Recomendaciones para la interpretación y ejecución de ensayos de integridad de pilotes y pantallas in situ” (2008), si se asemeja el pilote a una varilla (cilindro-barra) las frecuencias naturales a las que se producen las resonancias se generan a unos valores que dependen de las condiciones de la punta del pilote. En un pilote con la punta libre, las resonancias se producen a las frecuencias:

$$f_i = \frac{i \times c}{2L}$$

La amplitud de la respuesta a las frecuencias naturales dependerá de la magnitud de la excitación y del amortiguamiento del conjunto pilote-terreno.

La primera resonancia que se produce en el pilote se genera a una frecuencia que depende de las condiciones de apoyo de la punta. Independientemente de las condiciones de apoyo del pilote, si una primera resonancia se produce a una frecuencia f_1 , la siguiente se producirá a una frecuencia f_2 que depende del tiempo (t) que tarda la onda en realizar un ciclo de ida y vuelta:

$$f_2 = f_1 + \frac{1}{t}$$

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

L = distancia a la que se produce la reflexión de la onda.

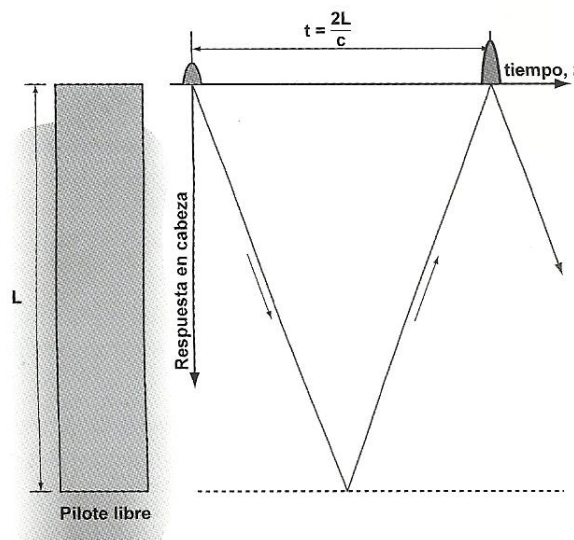


Gráfico 2-27 CURVA DE ECO TEÓRICA DE PILOTE EN CONDICIONES DE PUNTA LIBRE
Fuente: (CEDEX, 2008)

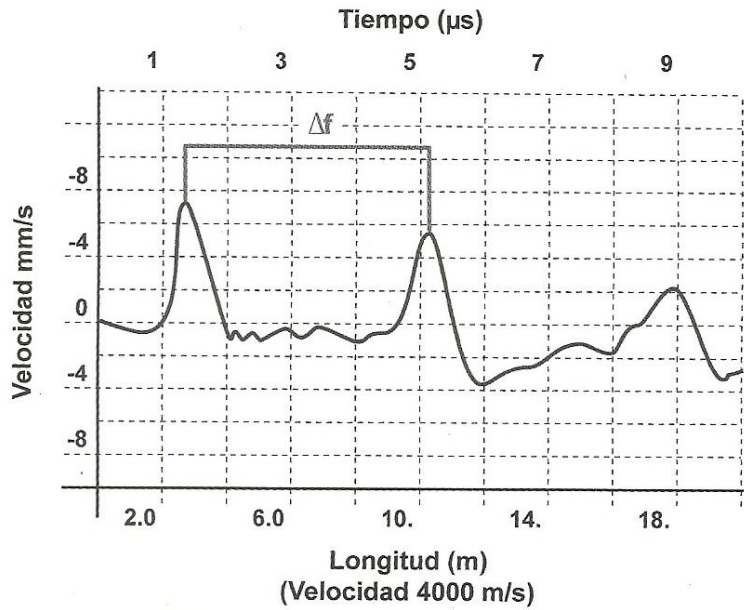


Gráfico 2-28 CURVA REAL DE ECO DE UN PILOTE EN CONDICIONES DE PUNTA LIBRE
Fuente: (CEDEX, 2008)

Por otra parte, Daniel Gómez en “Estudios sobre ensayos de integridad estructural de pilotes” (2010) indica que en un reflectograma ideal de un pilote continuo con empotramiento en roca o suelo duro, la curva final tendrá diferente polaridad a la curva inicial, es decir, el sentido de la curva final será hacia arriba. Lo mismo ocurre en el caso de un ensanchamiento del pilote puesto que existe un aumento de la sección transversal por donde se desplazan las ondas.

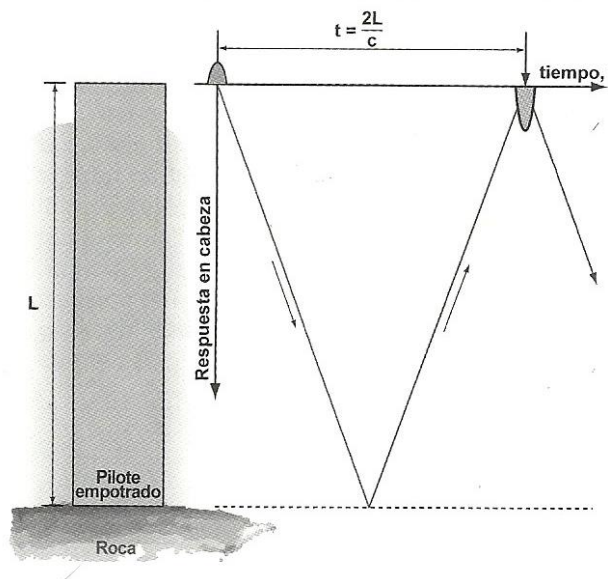


Gráfico 2-29 CURVA TEÓRICA DE PILOTE EN CONDICIONES DE PUNTA CON EMPOTRAMIENTO
Fuente: (CEDEX, 2008)

En un pilote continuo empotrado en roca o suelo duro, el impacto de un martillo de mano genera una onda de compresión y la onda reflejada por la punta será también de compresión, puesto que si se idealiza el pilote como una serie de partículas, estas recibirán una fuerza de compresión desde la cabeza del pilote hasta la partícula que representa la punta del pilote, donde existe debajo de la misma un material duro que imposibilita que la fuerza de compresión se desplace hacia abajo por lo que retorna con dirección hacia arriba comprimiendo cada una de las partículas hasta llegar a la cabeza del elemento.

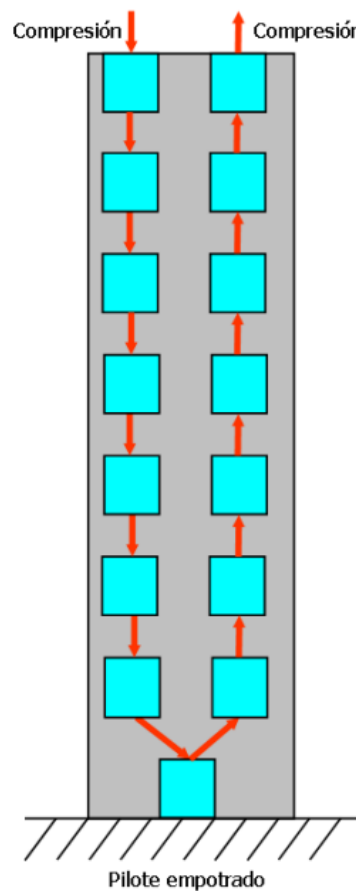


Gráfico 2-30 COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS EN UN PILOTE CONTINUO CON EMPOTRAMIENTO EN ROCA O SUELO DURO
Fuente: (Daniel Gómez García, 2010)

En un pilote con la punta empotrada, las resonancias se producen a las frecuencias:

$$f_i = \frac{(2i + 1)c}{4L}$$

Ya que el método lo permite se analizara que las reflexiones en el mismo sentido que las del impacto se deben a un descenso en la impedancia y en sentido contrario a un aumento de la impedancia.

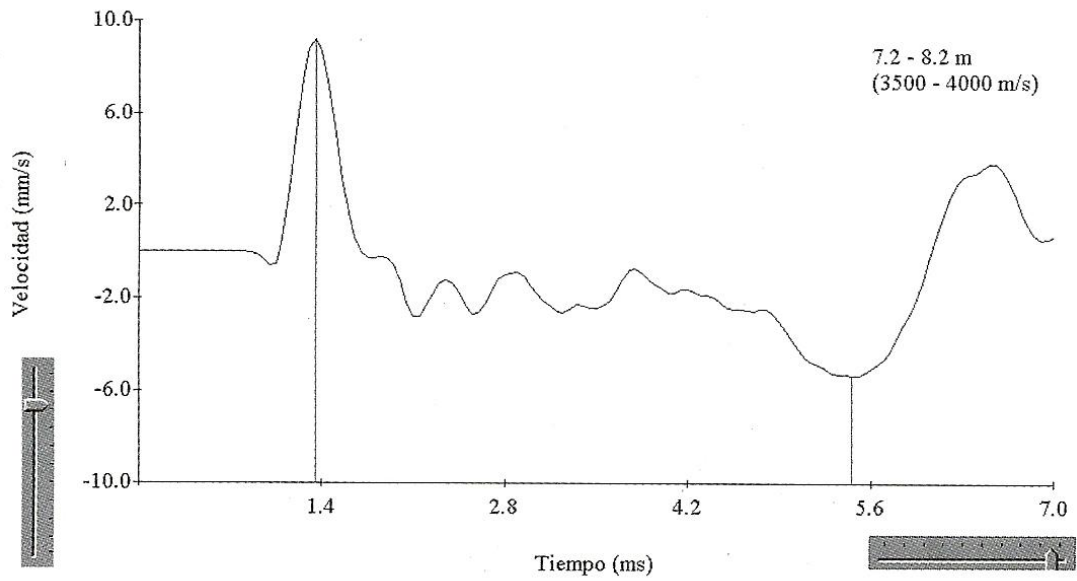


Gráfico 2-31 CURVA REAL DE UN PILOTE EN CONDICIONES DE PUNTA CON EMPOTRAMIENTO
Fuente: (CEDEX, 2008)

CIRIA en “Integrity testing in piling practice” (1997) propone la siguiente clasificación de las señales obtenidas con el Ensayo de Eco:

Señal tipo 0: No hay ecos en la curva de tiempos, lo que atendería el caso de pilotes sin cambios de impedancia dentro de terrenos rígidos que provocan un amortiguamiento importantísimo de la señal, es decir, no se presentan irregularidades hasta la profundidad de investigación. En el informe sencillamente se debería indicar que no se observa ninguna reflexión de la onda justificándolo.

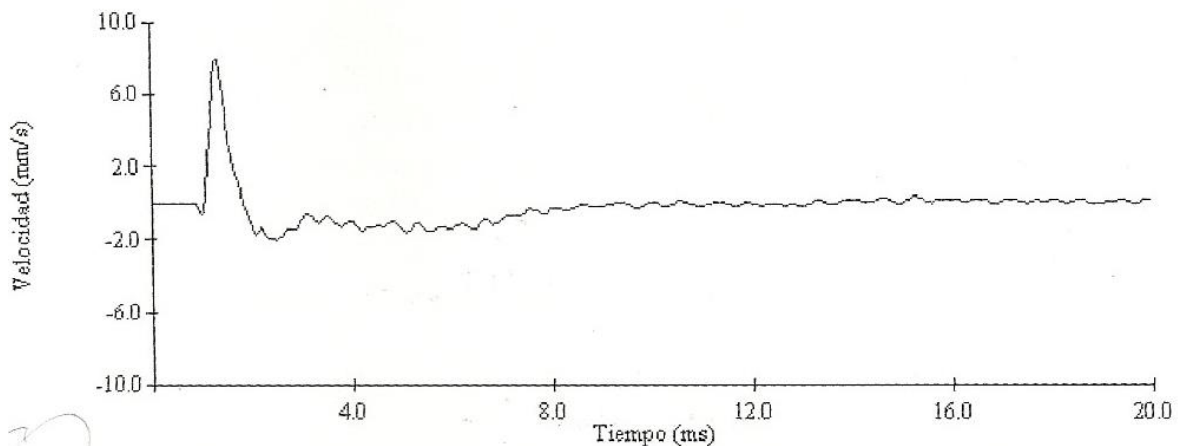


Gráfico 2-32 CURVA DE ECO TIPO 0
Fuente: (CEDEX, 2008)

Señal tipo 1: Solo existe la respuesta de una reflexión clara de la onda, por lo que en el informe se deberá indicar si corresponde a la punta del pilote al coincidir la profundidad con la teórica del elemento o si se observa una reducción de sección o cambio de impedancia que impide detectar el régimen vibratorio del fondo del pilote.

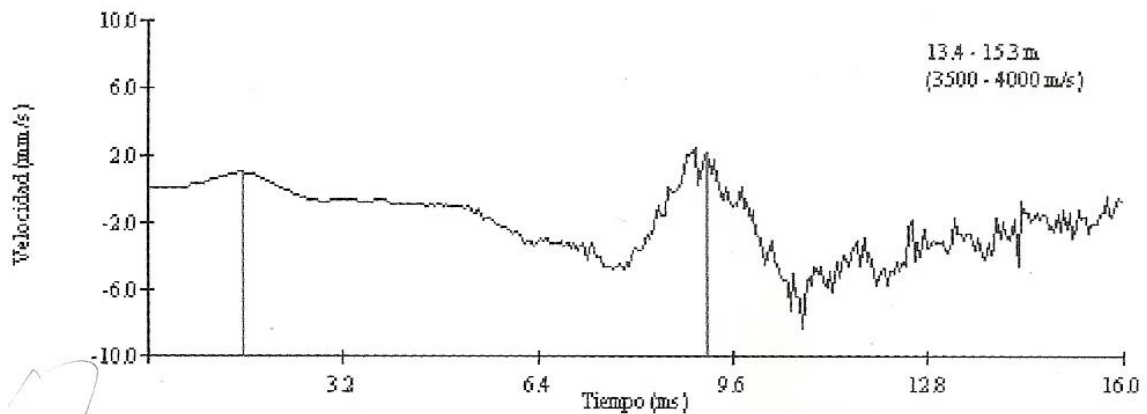


Gráfico 2-33 CURVA DE ECO TIPO 1
Fuente: (CEDEX, 2008)

Señal tipo 2: Estas señales son las que presentan más problemas de interpretación, puesto que se presentan varias reflexiones de la onda y solo una de ellas más significativa. En especial se plantean dos situaciones, una que se vea el fondo del pilote y al menos se puede evaluar la longitud total y otra en la que esto no sea posible porque las incidencias intermedias son muy significativas.

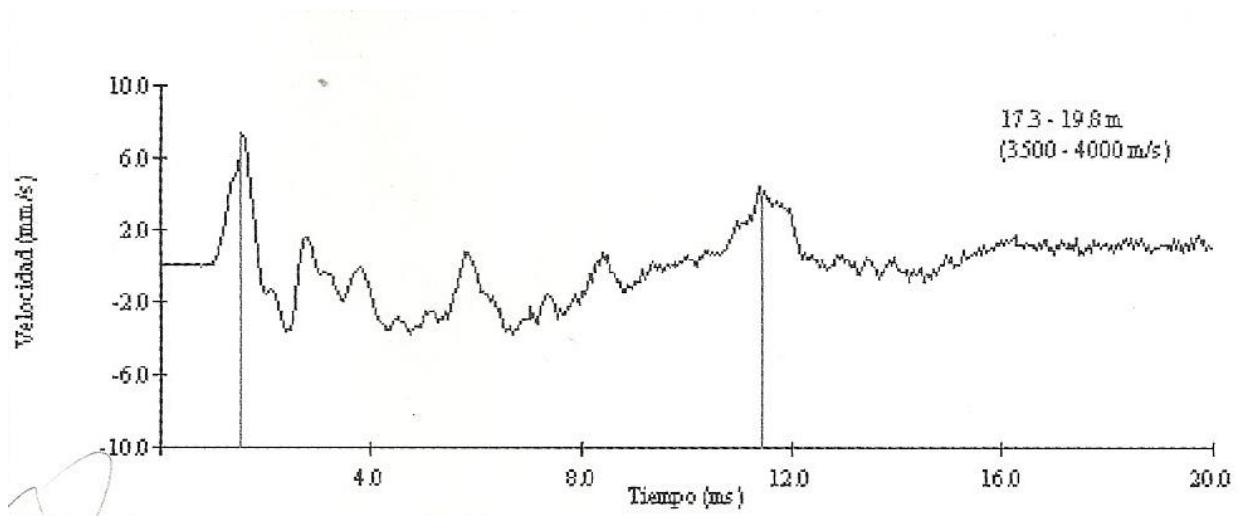


Gráfico 2-34 CURVA DE ECO TIPO 2
Fuente: (CEDEX, 2008)

Para el análisis e interpretación de las curvas obtenidas a través del método sónico, hay que tener en cuenta que la señal que recibamos en la cabeza del pilote estará afectada por:

- Cambios en las propiedades internas del material que conforma el pilote (deslavados o inclusiones) que se detectan como variaciones en la velocidad de propagación de la onda en el hormigón.
- Las características del terreno en el que se ha ejecutado el pilote y que también atenuara la señal de forma proporcional a la rigidez de éste. El análisis se complica si hay cambios de rigidez en el terreno, ya que cambios en capas del suelo pueden producir cambios de rigidez que habrá que separar de la propia integridad del pilote.
- Cambios en las propiedades geométricas del pilote (bulbos o reducciones).

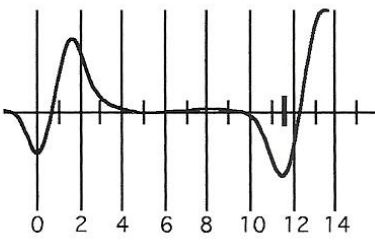
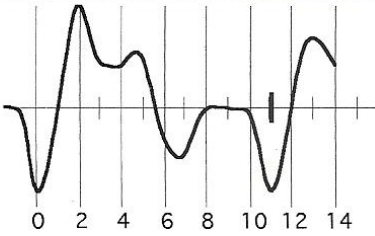
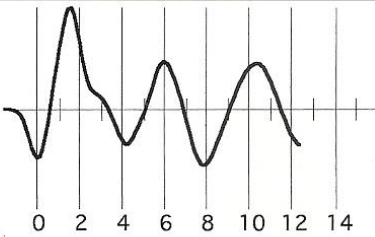
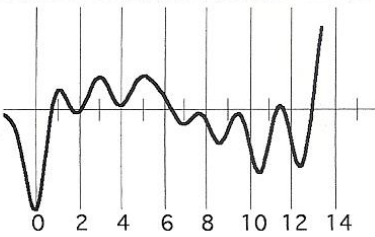
LONGITUD CALCULADA	DATOS	GRAFICO	OBSERVACIONES
11,6 m	V=4000 m/s Amplitud=26		Sin heterogeneidades
11,1 m	V=4000 m/s Amplitud=21		Aumento de sección a 5 m de profundidad
No se define V=4000 m/s Amplitud=55			Reducción de sección a 4,2 m No se observa la reflexión de la punta
No se define	V=4000 m/s Amplitud=10		Pilote sin descabezar No se observa la reflexión de la punta

Tabla 2-4 INTERPRETACIÓN DE CURVAS REALES DE ECO (JORAM M. AMIR)
Fuente: (CEDEX, 2008)

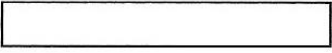
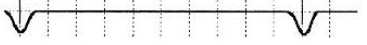
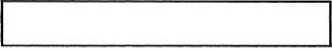
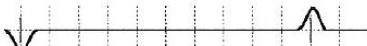
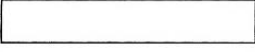

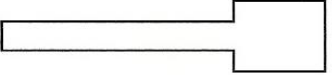

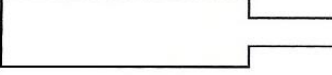

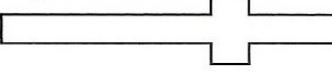

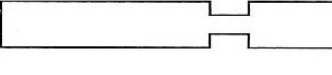
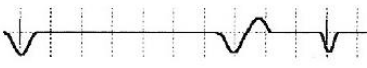
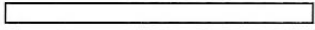

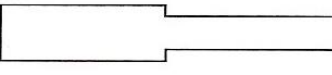
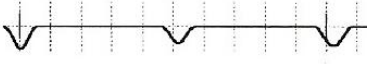

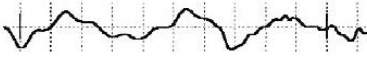
FORMA DEL PILOTE	DESCRIPCIÓN	CURVA DE ECO
	Pilote íntegro, punta libre longitud similar a la esperada.	
	Pilote íntegro, punta empu-trada y longitud similar a la esperada	
	Pilote íntegro, punta libre y longitud inferior a la esperada	
	Aumento de impedancia	
	Disminución de impedancia	
	Aumento localizado de impedancia	
	Disminución localizada de impedancia	
	Esbeltez del pilote alta o fuerte atenuación que oculta la reflexión de la punta	
	Reflexiones multiples por una discontinuidad intermedia que impide detectar la punta	
	Perfil muy irregular del pilote en profundidad	

Tabla 2-5 INTERPRETACIÓN DE CURVAS TEÓRICAS DE ECO (JORAM M. AMIR)
Fuente: (CEDEX, 2008)


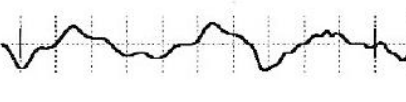

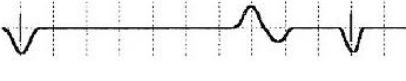


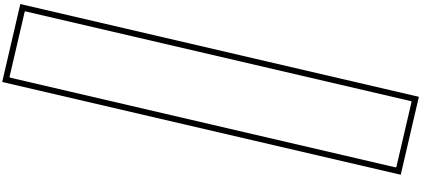
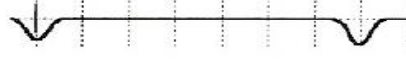
FORMA DEL PILOTE	DESCRIPCIÓN	CURVA DE ECO
	Variación gradual de la sección transversal	
	Inclusiones menores	
	Cambio axial de menor dimensión.	
	Falta de verticalidad.	

Tabla 2-6 INTERPRETACIÓN DE CURVAS TEORICAS DE ECO

Fuente: (AMIR, 1998)

Elaborado por: Josué Zumba, Abril 2017

2.3 FACTORES DE SEGURIDAD

Los factores de seguridad se utilizan para establecer el estado límite de falla y el estado límite de servicio, pero la selección de su valor es bastante subjetiva debido a que depende del tamaño e importancia de la obra, de la calidad de la información geotécnica y de las consecuencias de un posible fallo en la estructura o en la cimentación.

En el diseño de la cimentación se utilizan factores de seguridad para garantizar que los esfuerzos producidos por la estructura sometida a cargas de servicio reales, sean menores a los admisibles por el subsuelo.

Se calcula un factor de seguridad único en un análisis determinístico y un factor de seguridad promedio en un análisis probabilístico, el cual se obtendrá principalmente de variables que incluyan los posibles cambios que pueden ocurrir en la geometría del sistema, el nivel de confiabilidad de los parámetros del suelo y los probables niveles máximos y mínimos del nivel de agua que deben ser tomados en cuenta para el diseño de puentes.

En el diseño geotécnico comúnmente se utiliza un factor de seguridad único, que engloba todas las incertidumbres del diseño, sin analizar factores de seguridad individuales para los efectos de las cargas, para la resistencia de los distintos geomateriales, etc.

Es posible determinar valores máximos de factores de seguridad para la condición más desfavorable y valores mínimos de factores de seguridad para la condición más favorable, lo que permitirá obtener mediante un análisis estadístico el valor de factor de seguridad con la mayor probabilidad de falla.

2.3.1 NORMATIVA NEC-2015 SOBRE FACTORES DE SEGURIDAD EN PILOTES

La capacidad de carga de un pilote debe ser analizada por su resistencia en la punta y por su fricción lateral.

Para estimar la capacidad de carga última de la punta del pilote se puede utilizar un análisis de equilibrio límite o métodos sustentados en la teoría plástica, utilizando los FSIM recomendados por la Norma Ecuatoriana de la Construcción, los cuales se indican en la Tabla 2-7.

CONDICIÓN	FSIM ADMISIBLE
Carga muerta + Carga viva normal	3
Carga muerta + Carga viva máxima	2.5
Carga muerta + Carga viva normal + Sismo de diseño pseudoestático	1.5

Tabla 2-7 FACTORES DE SEGURIDAD INDIRECTOS MÍNIMOS (FSIM)

Fuente: (NEC, 2015)

Elaborado por: Josué Zumba, Abril 2017

En el análisis de equilibrio límite para estimar la resistencia en la punta del pilote, se determina la carga de falla para el sistema, como el menor entre los siguientes valores:

- 1) La sumatoria de las capacidades de carga de cada uno de los pilotes.
- 2) La sumatoria de las capacidades de carga de cada uno de los grupos de pilotes.
- 3) La capacidad de carga de un terreno con la misma geometría de la envolvente del grupo de pilotes.

La capacidad de carga de un pilote sometido a cargas excéntricas, se analizara utilizando la teoría de la elasticidad o evaluando la interacción suelo-estructura.

En su capítulo de Geotecnia y Cimentaciones (NEC-SE-GC), se señala que se debe verificar la capacidad portante última calculada para el pilote, a través de ensayos de carga ejecutados según lo estipulado en la Norma ASTM D1143.

El número mínimo de ensayos de carga en pilotes que se debe realizar para poder reducir los factores de seguridad indirectos mínimos (FSIM) utilizados en el diseño de la cimentación, dependerá de la categoría de la estructura según se indica en la Tabla 2-8.

CATEGORÍA	PRUEBAS DE CARGA
BAJA	≥ 1
MEDIA	≥ 2
ALTA	≥ 3
ESPECIAL	≥ 5

Tabla 2-8 NÚMERO MÍNIMO DE PRUEBAS DE CARGA EN PILOTES PARA REDUCIR LOS FSIM

Fuente: (NEC, 2015)

Elaborado por: Josué Zumba, Abril 2017

La capacidad de carga última bajo el principio de resistencia al corte de un pilote barrenado se obtendrá de la siguiente expresión:

$$Q_{ult} = Q_s + Q_t = \Sigma f_{si} A_{si} + q_t A_t$$

Q_s = Capacidad ultima del fuste del pilote o resistencia por fricción.

Q_t = Capacidad ultima de la punta del pilote.

A_t = Área de la sección transversal de la punta del pilote.

A_{si} = Área perimetral del fuste del pilote.

f_{si} = Resistencia unitaria del fuste del pilote.

q_t = Resistencia unitaria de la punta del pilote.

La capacidad de carga última de un pilote barrenado se deberá comprobar mediante las metodologías que se indican a continuación:

- Método API Revisado propuesto por el American Petroleum Institute.
- Método Lambda Revisado (1972) establecido por Vijayvergiya y Focht.
- Método USACE propuesto por la Us Army Corps of Engineers.
- Método FHWA (Federal Highway Works Administration of the United States).

La FHWA indica un procedimiento propuesto por O'Neill & Reese (1999) que permite utilizar factores de seguridad para el fuste y la punta, dentro de los cálculos de capacidad de carga de un pilote aislado del tipo prebarrenado; pero en el cálculo de la capacidad de carga de un grupo de pilotes prebarrenados, aparte de los factores mencionados se deberá tener en cuenta el factor de eficiencia del grupo de pilotes que está determinado por la separación que existe entre estas unidades de obra.

Para determinar la capacidad de carga última del grupo de pilotes se utilizará la expresión:

$$Q_{g(u)} = n \times \Sigma Q_u$$

Q_u = resistencia última de cada pilote.

$Q_{g(u)}$ = resistencia última del grupo de pilotes.

n = factor de eficiencia del grupo de pilotes.

Si el factor de eficiencia del grupo de pilotes es mayor a uno, lo que ocurre para espaciamientos muy grandes, se considerara cada uno de los pilotes de forma aislada.

$$n = \frac{2 \times S \times (m + n - 2) + (4 \times D)}{p \times m \times n}$$

m = cantidad de columnas en el bloque de pilotes.

n = cantidad de filas en el bloque de pilotes.

D = diámetro promedio de los pilotes del conjunto.

S = espaciamiento entre centro y centro de pilotes.

p = perímetro de la sección transversal de cada elemento del conjunto.

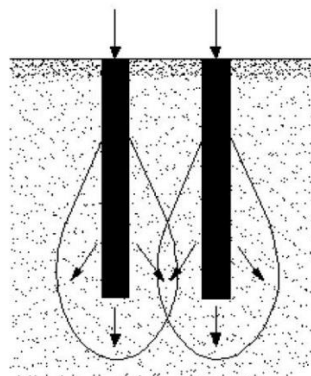


Gráfico 2-35 GRUPO DE PILOTES
Fuente: (NEC, 2015)

El asentamiento de un grupo de pilotes será mayor al asentamiento que tendrían como pilotes individuales ante cargas axiales idénticas en cada pilote.

La capacidad de carga admisible de un pilote barrenado se obtendrá de la siguiente expresión:

$$q_{adm} = \frac{q_u}{FS}$$

q_u = Capacidad de carga última.

El factor de seguridad (FS) puede ser determinado en función de las incertidumbres existentes dentro del cálculo de capacidad de carga última.

2.3.2 NORMATIVAS INTERNACIONALES SOBRE FACTORES DE SEGURIDAD EN PILOTES

Los ensayos de integridad estructural tienen por objeto verificar la continuidad del fuste y la resistencia mecánica del pilote, por lo que el Código Técnico de la Edificación sugiere que si se realizan ensayos de integridad estructural en la totalidad de los pilotes o en una muestra significativa, las cargas admisibles por razón estructural en el diseño de los pilotes se podrán incrementar en un 25%; sin embargo, la Normativa francesa sobre pilotes (DTU 13.2) señala que solo se podrá incrementar en un 20%.

El Código Técnico de la Edificación, indica que el número de ensayos no debe ser inferior a 1 por cada 20 pilotes, salvo en el caso de pilotes aislados con diámetros entre 45 y 100 cm que no debe ser inferior a 10 por cada 20 pilotes. En pilotes aislados de diámetro superior a 100 cm no debe ser inferior a 5 por cada 20 pilotes.

La Normativa Española en Proyectos Portuarios estableció un capítulo de Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM 0.5-05), en donde se indica que si se realizan los ensayos de integridad estructural en los pilotes se puede incrementar en un 20% sus cargas admisibles por razón estructural, debido a que se disminuye la incertidumbre en la construcción de cimentaciones profundas, lo que además permitiría una disminución en el costo de la misma.

CAPÍTULO III

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 METODOLOGÍA

En el ensayo sónico de integridad estructural de pilotes realizado para nuestro caso de estudio utilizamos un equipo desarrollado por la empresa inglesa Piletest conocido como Pile Echo Tester (PET), realizándose el ensayo según los requerimientos establecidos en la Norma ASTM D5882-16 para ensayos de baja deformación de integridad estructural de pilotes.

Debido a que el porcentaje estadístico de pilotes con presencia de fallos es reducido se decidió ensayar el 100% de los pilotes para nuestro caso de estudio.

Se estableció realizar tres ensayos para cada pilote, lo que permite garantizar una mayor confiabilidad de los resultados obtenidos. Es común almacenar al menos tres ensayos por pilote en el mismo punto para analizar la curva media valorando la desviación de cada golpe.

Si los ensayos en un mismo pilote no son repetibles, no se deberán utilizar los datos para la interpretación y será necesario preparar el pilote para poder alcanzar las condiciones de repetibilidad.

Los gráficos deberán ser muy claros con buena indicación de escalas, traducidos a magnitudes físicas como longitud del pilote.

Para la realización del informe con los resultados finales se admitieron las recomendaciones establecidas en la Norma ASTM D5882-16 en donde se indica establecer los siguientes datos generales:

- Nombre y ubicación de la obra.
- Resumen de la estratigrafía del suelo.
- Croquis con la identificación de los pilotes.
- Cotas de la cabeza y el fondo de perforación.
- Tipología del pilote incluyendo su sistema constructivo, características del hormigón, longitud, diámetro y edad del hormigón en el momento del ensayo.
- Incidencias en la construcción de los pilotes.
- Descripción general del equipo utilizado.
- Fecha de ensayo de los pilotes.

El informe además de la definición del método empleado y las curvas en las que se hayan marcado las señales más significativas desde el punto de vista del análisis de la integridad estructural, deberá contener:

- Tipo de técnica empleada y método de análisis.
- Longitud auscultada más profunda, que será la longitud del pilote si no hay señales intermedias que atenúen la señal de la onda.
- Si las profundidades son intermedias y no el fondo del pilote, se deberá incluir una estimación de la magnitud de la variación de la impedancia y las causas que la provocaron.
- Si se dispone o no de la información geotécnica del sitio de implantación de la estructura y de las incidencias durante la perforación y la ejecución del hormigonado de los pilotes.

Cuando no se visualiza adecuadamente la reflexión de la onda en la punta del pilote, lo que ocurre en pilotes demasiado esbeltos, en el informe se deberá indicar hasta que profundidad puede considerarse válido el estudio.

La evaluación final de los resultados obtenidos indicara que el pilote es aceptable, si no se presentan anomalías en las gráficas; es defectuoso, si se concluye que los defectos afectan la capacidad estructural del mismo; y es cuestionable, si resulta complejo la interpretación de las gráficas obtenidas.

Si se considera el pilote aceptable se puede asegurar que existe concordancia entre su comportamiento real y su comportamiento teórico. Por el contrario si se determina un pilote como defectuoso será necesario establecer si el tipo de fallos que presenta puede ser solucionado o necesariamente el pilote debe ser reemplazado. De la misma manera si el pilote es catalogado como cuestionable, se deberá realizar ensayos complementarios como el ensayo cross-hole ultrasónico, o las pruebas estáticas o dinámicas de carga.

No se recomienda realizar ensayos complementarios del tipo de sondeo con recuperación de testigo puesto que resultan bastante complicados si se realizan a profundidades significativas y pueden llegar a afectar el pilote si no se evita la vibración de la armadura, pero sobre todo, el testigo extraído no representara la condición real de la heterogeneidad detectada al ser generalmente alterado durante el proceso de extracción.

Si se determinan fallos reparables se deberá determinar si el costo de la reparación es menor al que resulta de sustituir el pilote, situación que generalmente no sucede, sobre todo en pilotes de diámetros muy grandes cuyo encepado es bastante reducido. Si estos fallos se encuentran únicamente en la parte superior del pilote se podría demoler dicha zona y construirla nuevamente, si el defecto se encuentra a mayor profundidad y dependiendo el tipo de fallo existe la posibilidad de solucionarlo mediante diversos tratamientos de mejora.

La solución más sencilla a la que podemos recurrir ante la presencia de un defecto detectado en un pilote es el recálculo en el diseño de la cimentación, para redistribuir las cargas de manera que los pilotes no ejecutados del encepado sean diseñados nuevamente para poder soportar mayores esfuerzos que los previstos anteriormente.

La aplicación de inyecciones a presión de hormigón generalmente le dan solución a la mayoría de los defectos detectados, tales como fisuras, coqueras, deslavados del hormigón por flujos de agua o hasta para consolidar el suelo resistente en punta que ha sido alterado durante la perforación.

La presión de la inyección de hormigón dependerá del tipo de defecto que se está tratando, por lo que será muy diferente la necesaria para rellenar coqueras a lo largo del fuste, la indispensable para consolidar el suelo resistente en punta y la que se requiere para corregir un deslavado del hormigón; así mismo, el tipo de lechada dependerá de la clase de reparación que se está realizando, por lo que puede ser de cemento o una mezcla de bentonita y cemento.

Pero ante la presencia de cortes o roturas en el pilote extendidos en toda su sección es recomendable reforzar el pilote mediante perforaciones de micropilotes o barras de acero en el interior del elemento para dar solución a este defecto.

Sin embargo, resulta necesario realizar nuevamente los ensayos de auscultación de pilotes para verificar si el defecto reparado fue realizado adecuadamente y ya no perjudica al comportamiento de la cimentación.

Para poder intuir las causas que produjeron el defecto físico en el pilote, se debe conocer el perfil geotécnico de su entorno, su proceso constructivo y posibles incidencias durante la perforación, durante el suministro de hormigón y durante el proceso de hormigonado, por tal razón, se ha establecido el siguiente formato para recopilar la información necesaria que permita una adecuada interpretación de los resultados obtenidos a través de estos ensayos.

3.2 RESULTADOS

Para la ejecución de los ensayos se estableció el siguiente croquis que permite la identificación de cada uno de los pilotes que conforman los estribos y pilas del puente.

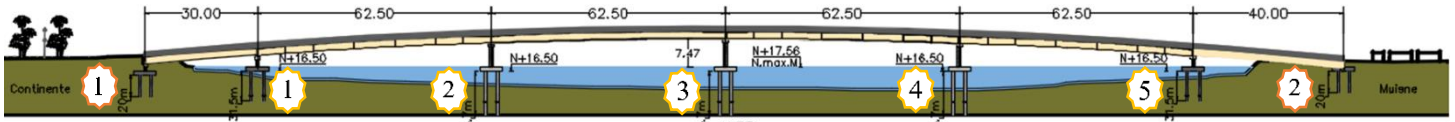


Gráfico 3-1 IDENTIFICACIÓN DE PILAS Y ESTRIBOS
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

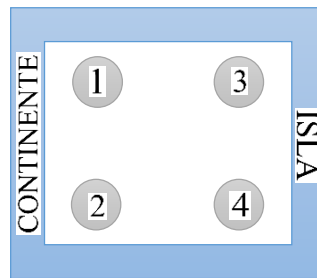


Gráfico 3-2 IDENTIFICACIÓN DE LOS PILOTES DEL ENCEPADO
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

ESTRIBO 1 - PILOTE 1

Edad del hormigón al momento del ensayo: 7 días

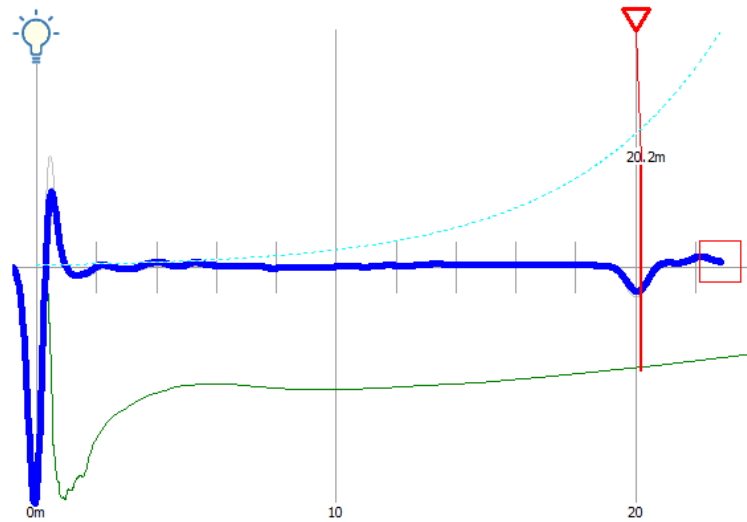


Gráfico 3-3 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 1 DEL ESTRIBO 1
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

ESTRIBO 1 - PILOTE 2

Edad del hormigón al momento del ensayo: 7 días

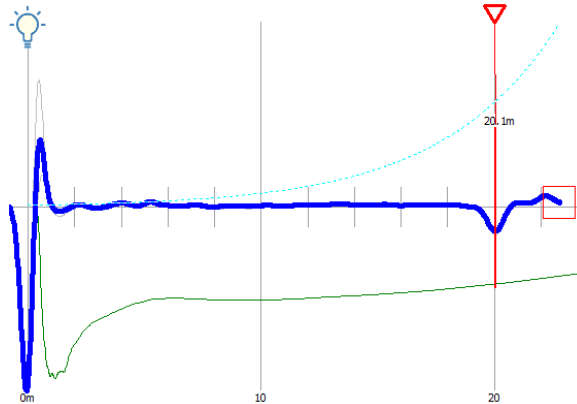


Gráfico 3-4 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 2 DEL ESTRIBO 1
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

ESTRIBO 1 - PILOTE 3

Edad del hormigón al momento del ensayo: 5 días

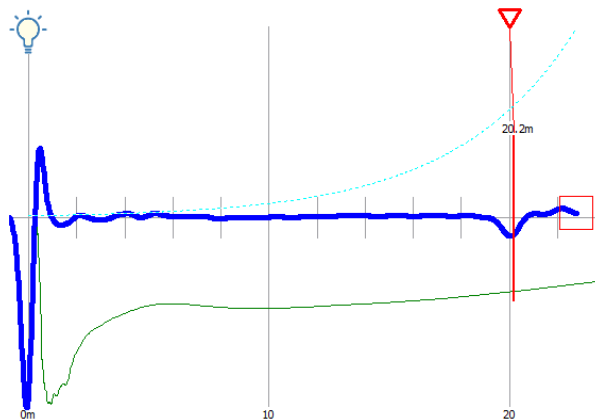


Gráfico 3-5 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 3 DEL ESTRIBO 1
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

ESTRIBO 1 - PILOTE 4

Edad del hormigón al momento del ensayo: 5 días

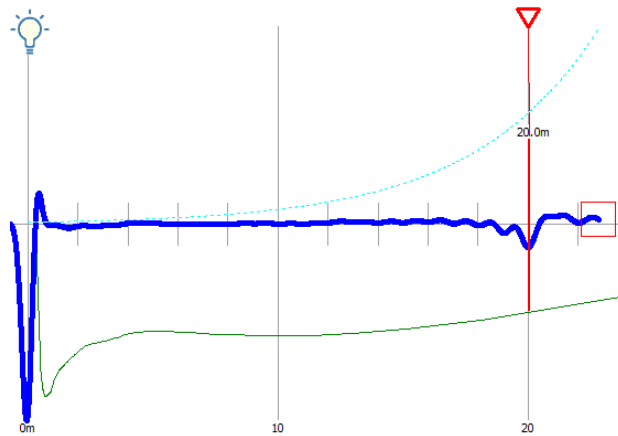


Gráfico 3-6 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 4 DEL ESTRIBO 1
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 1 - PILOTE 1

Edad del hormigón al momento del ensayo: 7 días

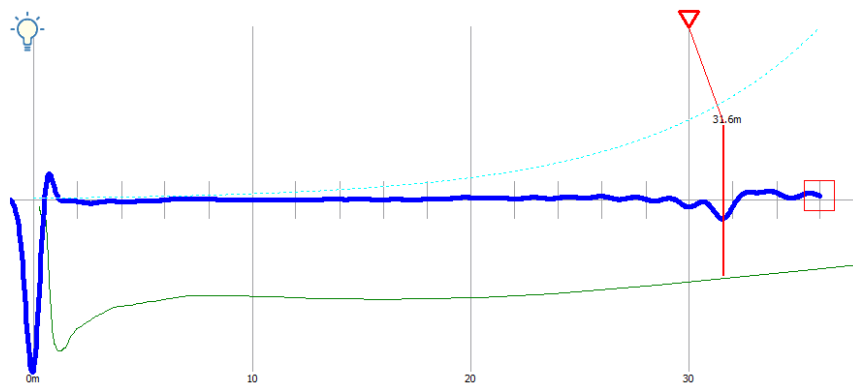


Gráfico 3-7 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 1 DE LA PILA 1
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 1 - PILOTE 2

Edad del hormigón al momento del ensayo: 7 días

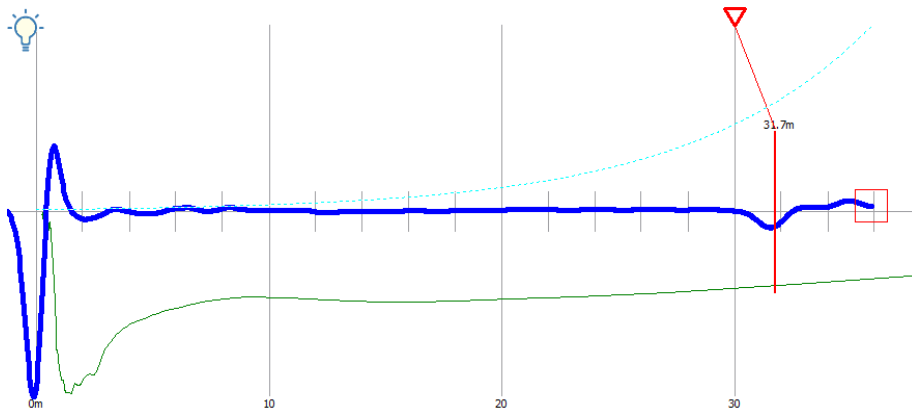


Gráfico 3-8 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 2 DE LA PILA 1
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 1 - PILOTE 3

Edad del hormigón al momento del ensayo: 10 días

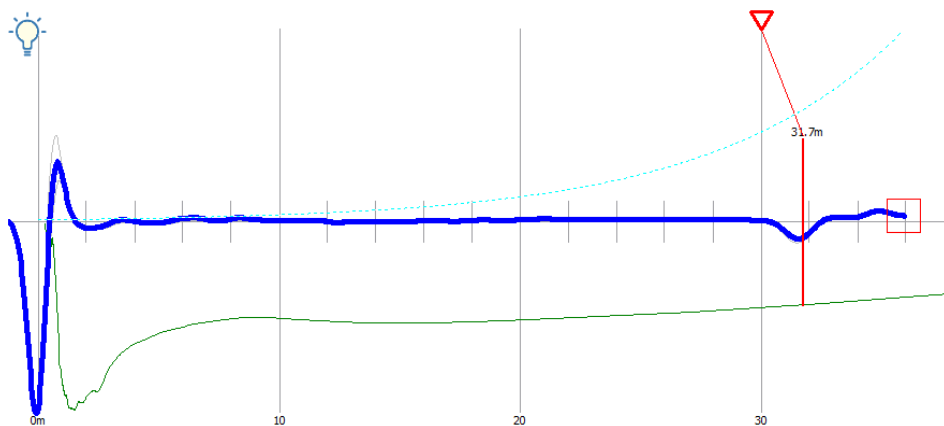


Gráfico 3-9 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 3 DE LA PILA 1
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 1 - PILOTE 4

Edad del hormigón al momento del ensayo: 10 días

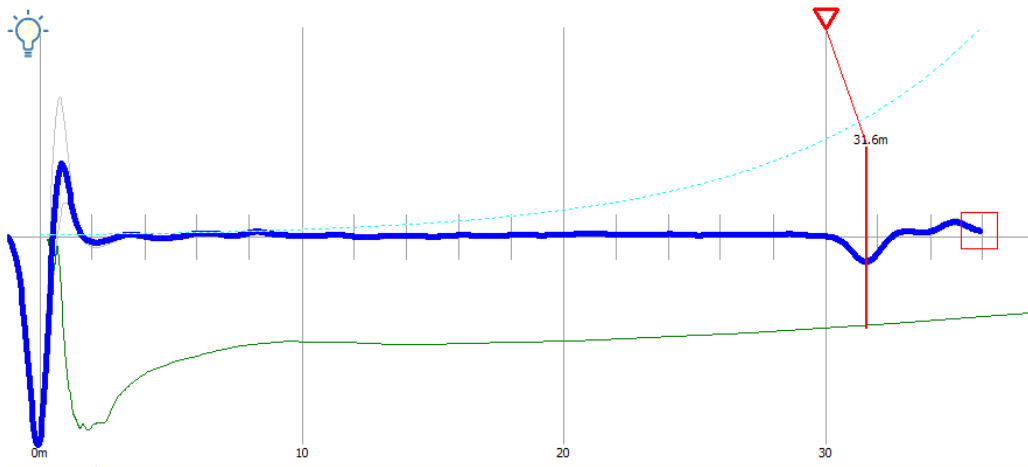


Gráfico 3-10 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 4 DE LA PILA 1
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 2 - PILOTE 1

Edad del hormigón al momento del ensayo: 7 días

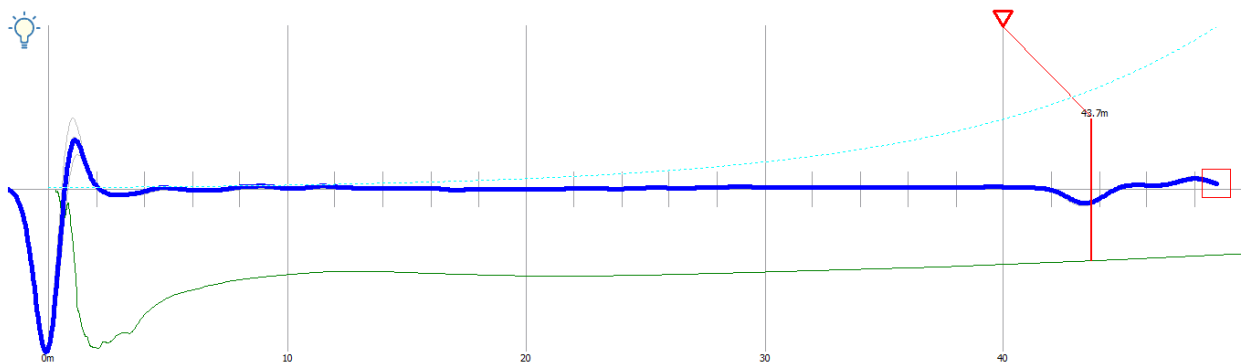


Gráfico 3-11 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 1 DE LA PILA 2
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 2 - PILOTE 2

Edad del hormigón al momento del ensayo: 7 días

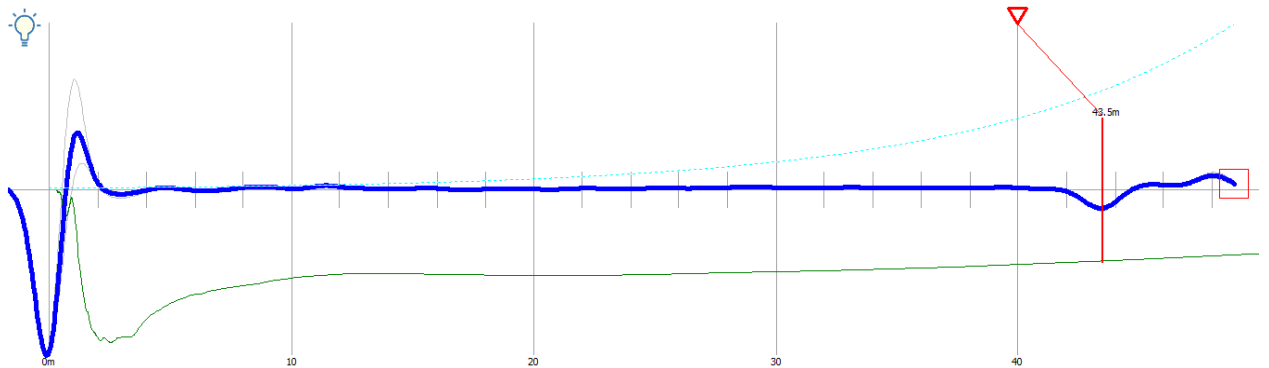


Gráfico 3-12 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 2 DE LA PILA 2
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 2 PILOTE 3

Edad del hormigón al momento del ensayo: 10 días

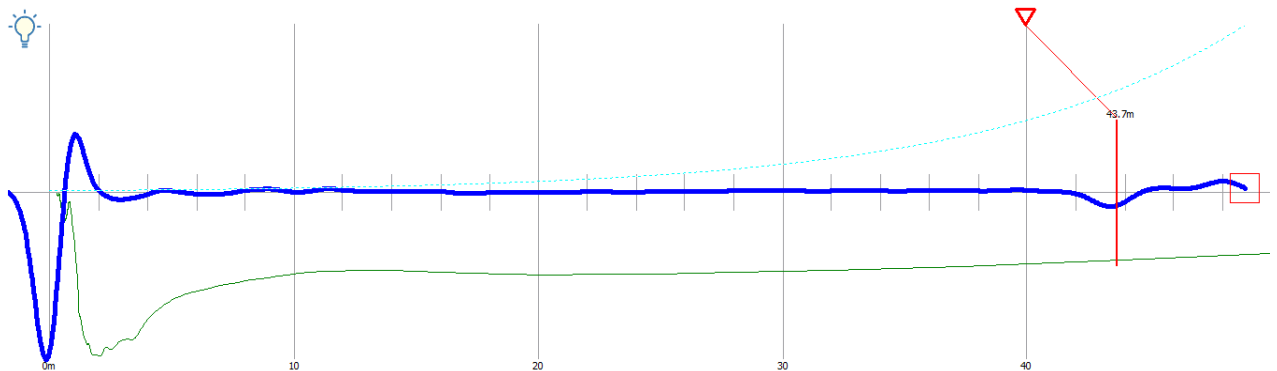


Gráfico 3-13 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 3 DE LA PILA 2
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 2 - PILOTE 4

Edad del hormigón al momento del ensayo: 10 días

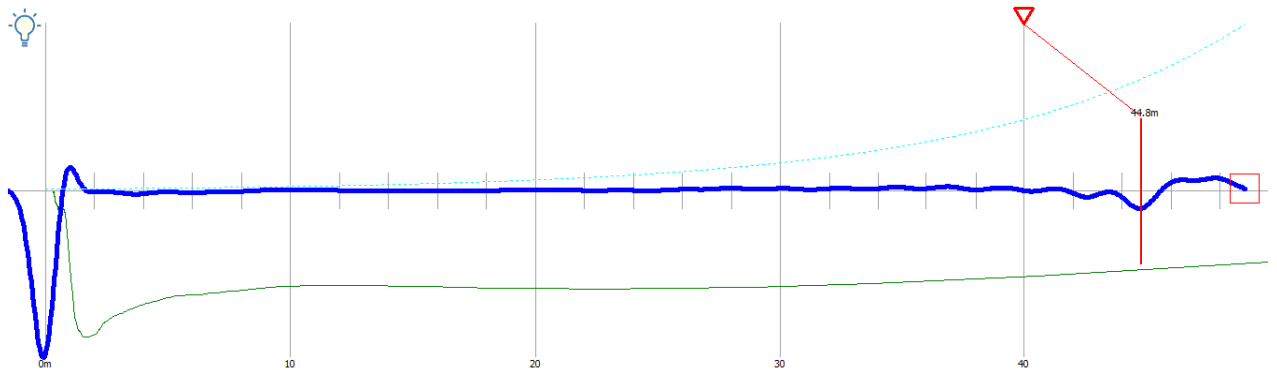


Gráfico 3-14 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 4 DE LA PILA 2
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 3 - PILOTE 1

Edad del hormigón al momento del ensayo: 7 días

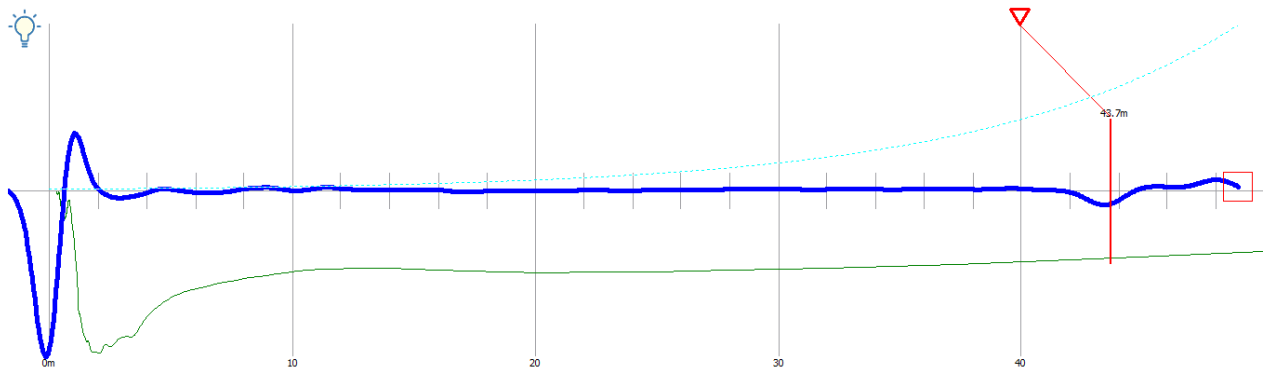


Gráfico 3-15 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 1 DE LA PILA 3
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 3 - PILOTE 2

Edad del hormigón al momento del ensayo: 7 días

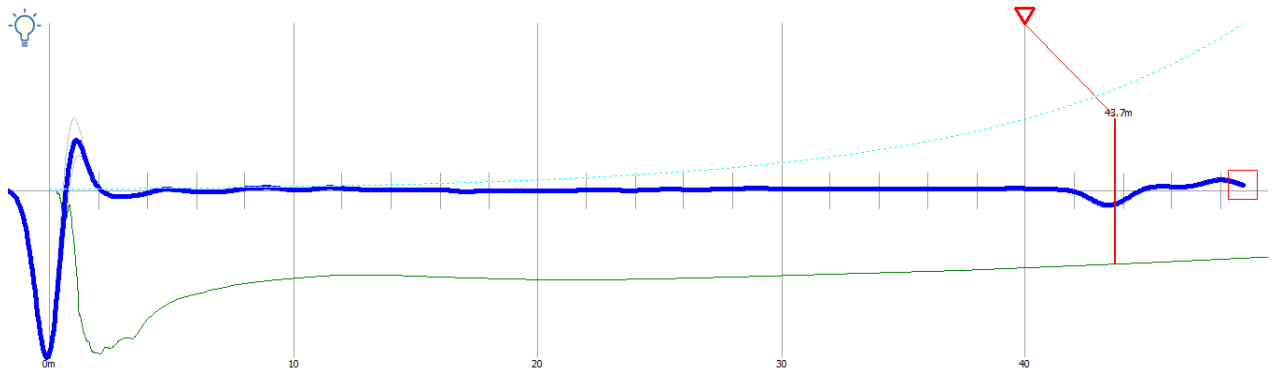


Gráfico 3-16 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 2 DE LA PILA 3
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 3 - PILOTE 3

Edad del hormigón al momento del ensayo: 10 días

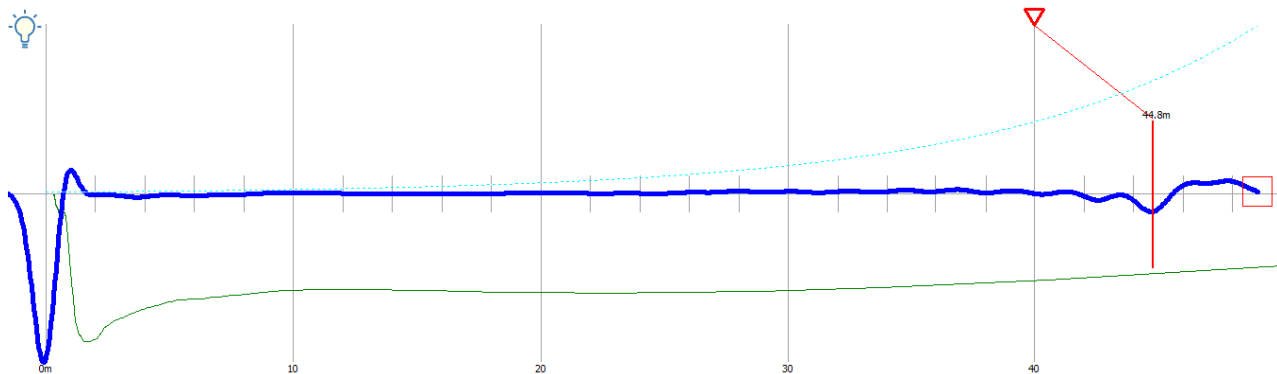


Gráfico 3-17 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 3 DE LA PILA 3
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 3 - PILOTE 4

Edad del hormigón al momento del ensayo: 10 días

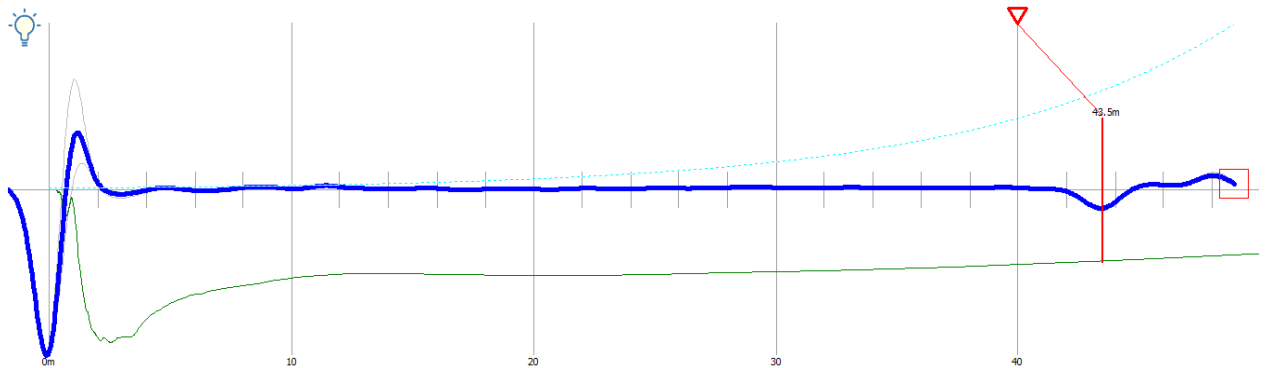


Gráfico 3-18 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 4 DE LA PILA 3
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 4 - PILOTE 1

Edad del hormigón al momento del ensayo: 7 días

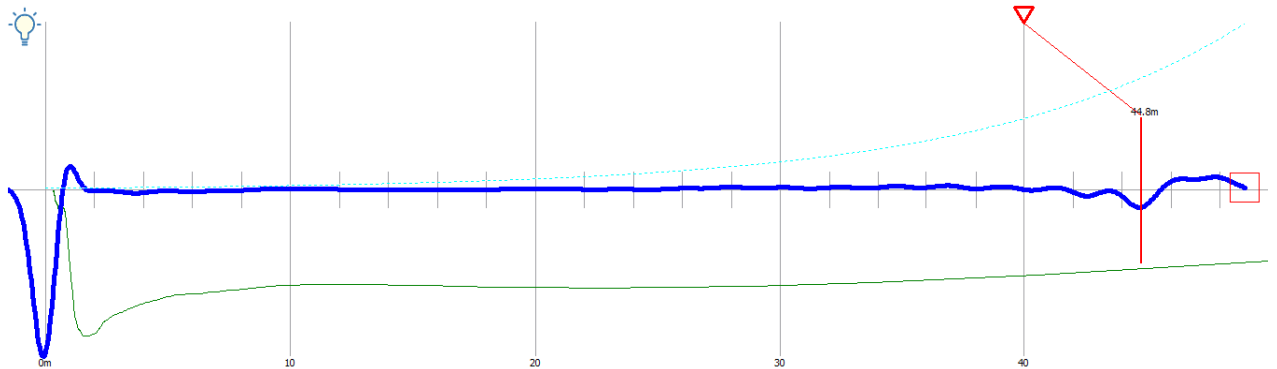


Gráfico 3-19 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 1 DE LA PILA 4
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 4 - PILOTE 2

Edad del hormigón al momento del ensayo: 7 días

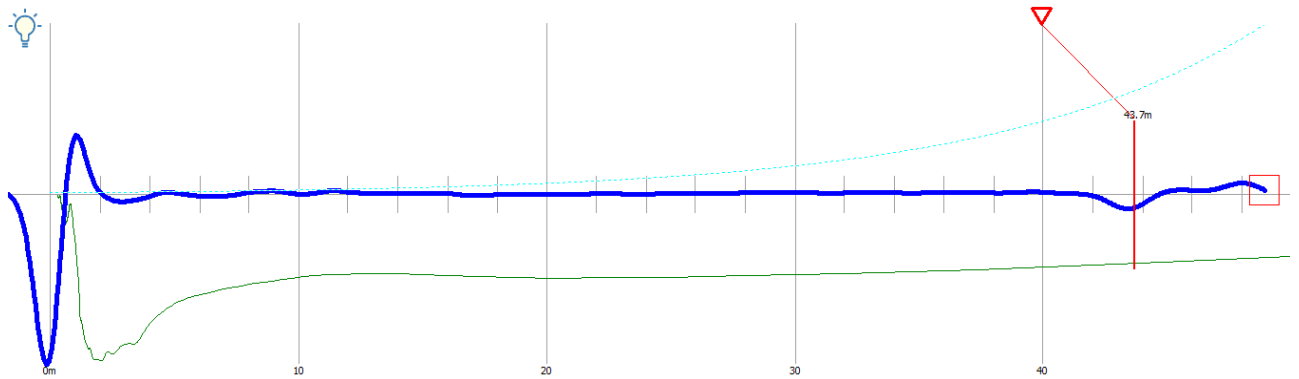


Gráfico 3-20 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 2 DE LA PILA 4
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 4 - PILOTE 3

Edad del hormigón al momento del ensayo: 10 días

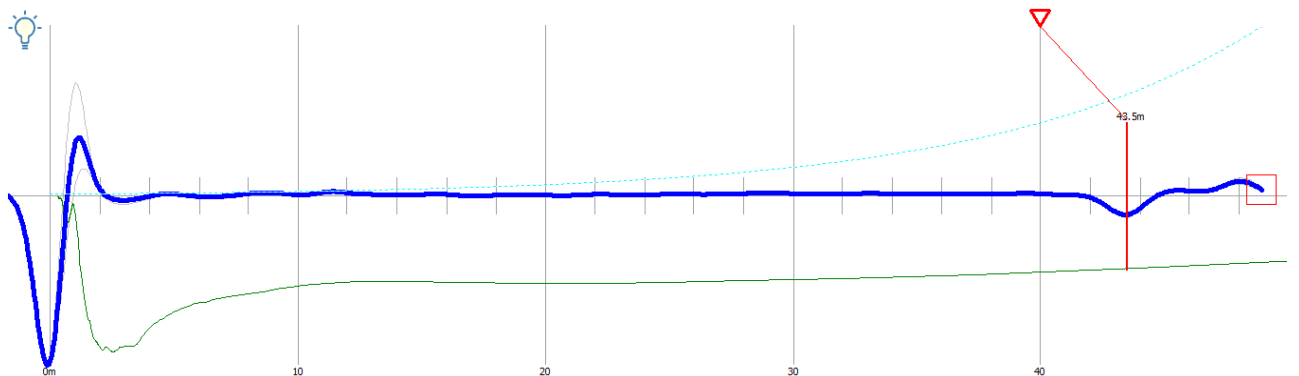


Gráfico 3-21 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 3 DE LA PILA 4
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 4 - PILOTE 4

Edad del hormigón al momento del ensayo: 10 días

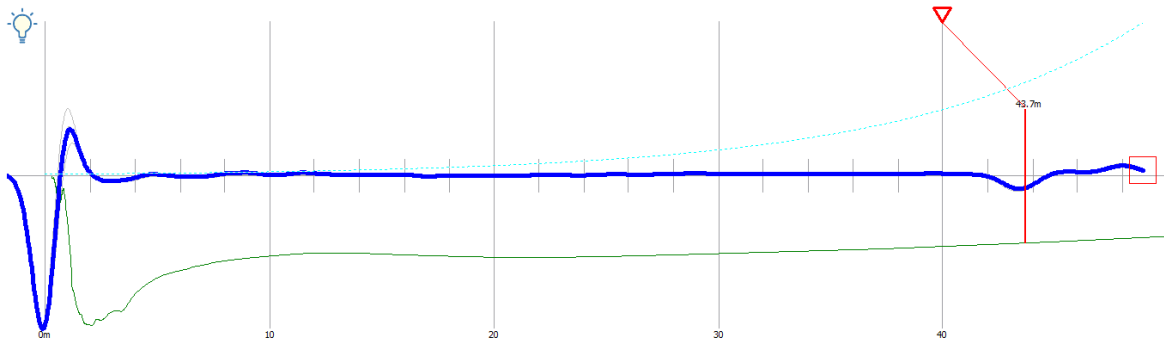


Gráfico 3-22 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 4 DE LA PILA 4
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 5 - PILOTE 1

Edad del hormigón al momento del ensayo: 7 días

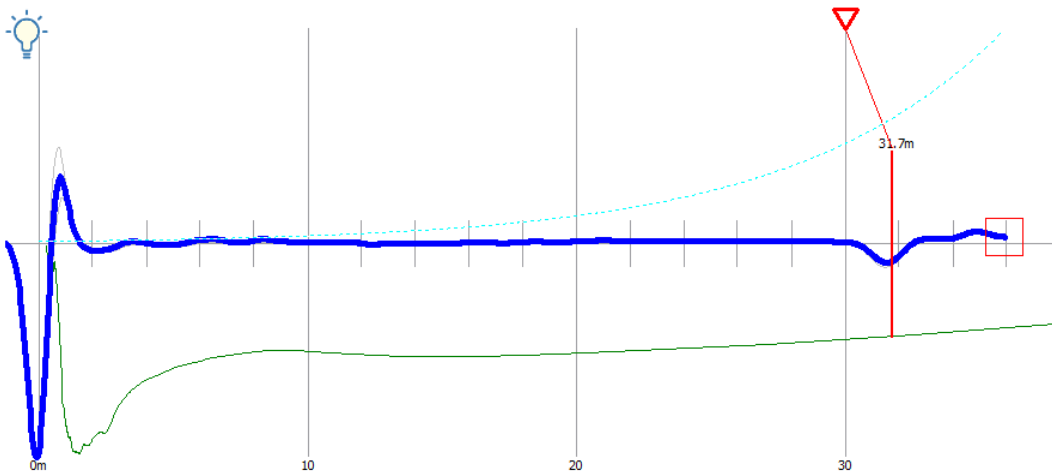


Gráfico 3-23 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 1 DE LA PILA 5
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 5 - PILOTE 2

Edad del hormigón al momento del ensayo: 7 días

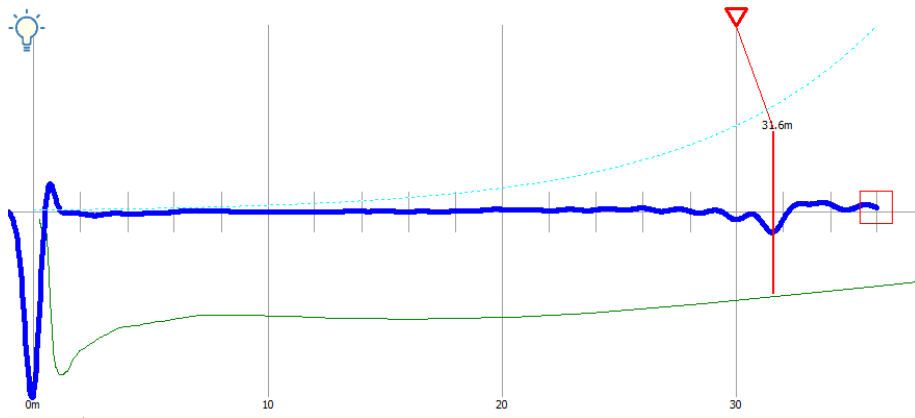


Gráfico 3-24 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 2 DE LA PILA 5
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 5 - PILOTE 3

Edad del hormigón al momento del ensayo: 10 días

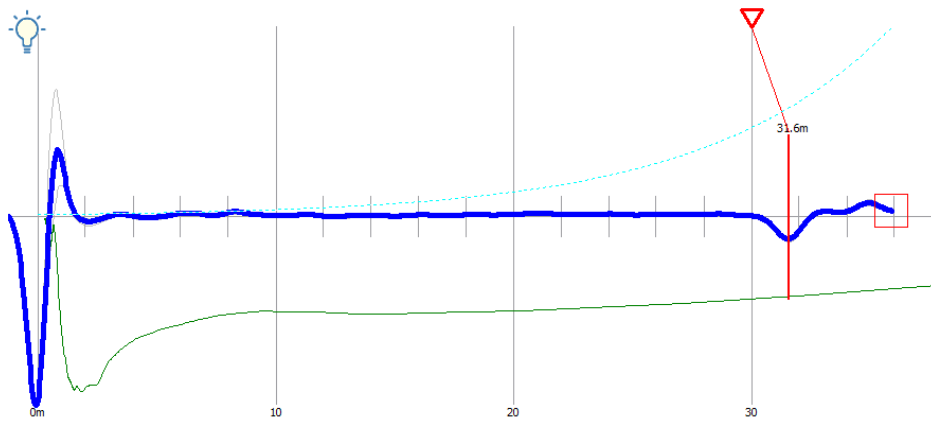


Gráfico 3-25 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 3 DE LA PILA 5
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

PILA 5 - PILOTE 4

Edad del hormigón al momento del ensayo: 10 días

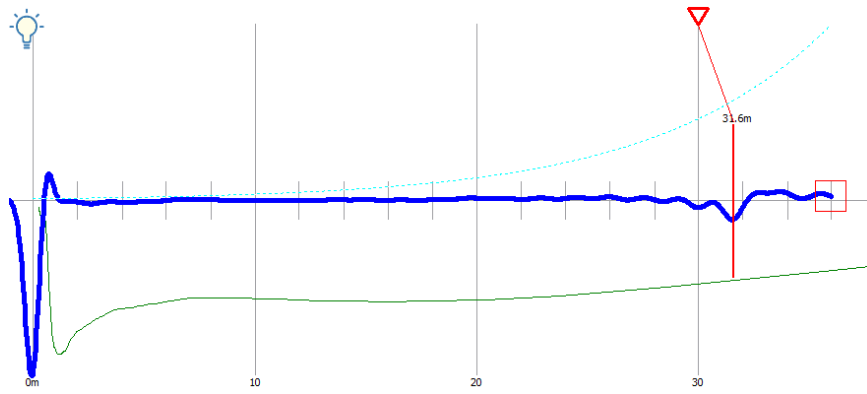


Gráfico 3-26 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 4 DE LA PILA 5
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

ESTRIBO 2 - PILOTE 1

Edad del hormigón al momento del ensayo: 7 días

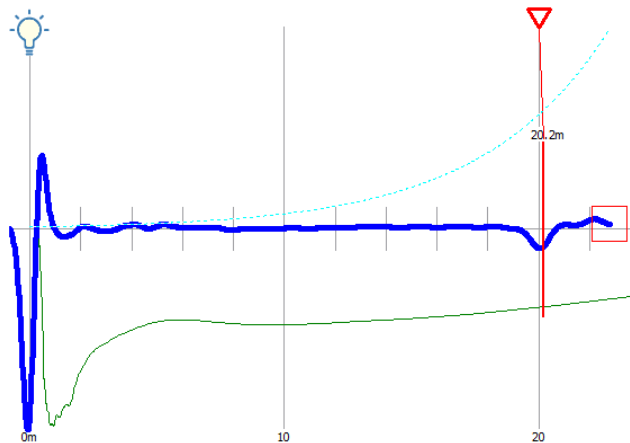


Gráfico 3-27 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 1 DEL ESTRIBO 2
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

ESTRIBO 2 - PILOTE 2

Edad del hormigón al momento del ensayo: 7 días

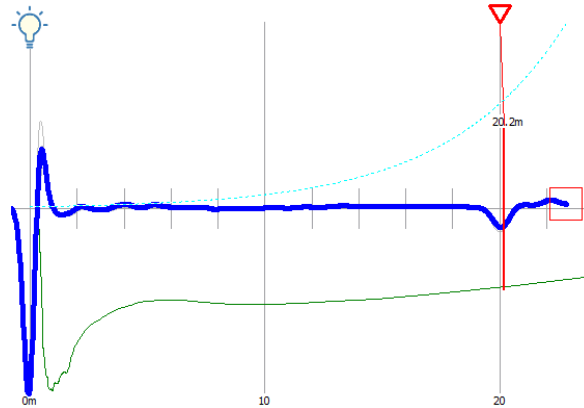


Gráfico 3-28 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 2 DEL ESTRIBO 2
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

ESTRIBO 2 - PILOTE 3

Edad del hormigón al momento del ensayo: 5 días

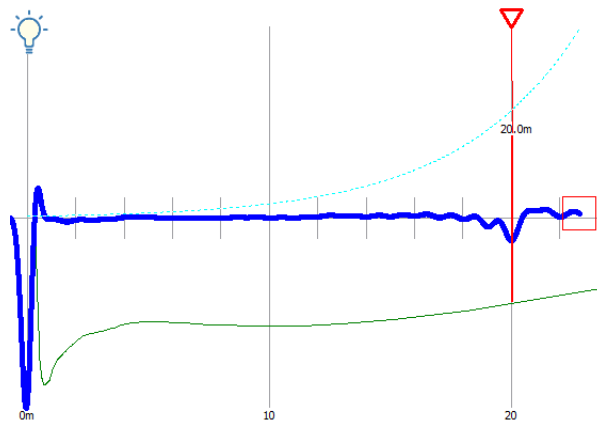


Gráfico 3-29 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 3 DEL ESTRIBO 2
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

ESTRIBO 2 - PILOTE 4

Edad del hormigón al momento del ensayo: 5 días

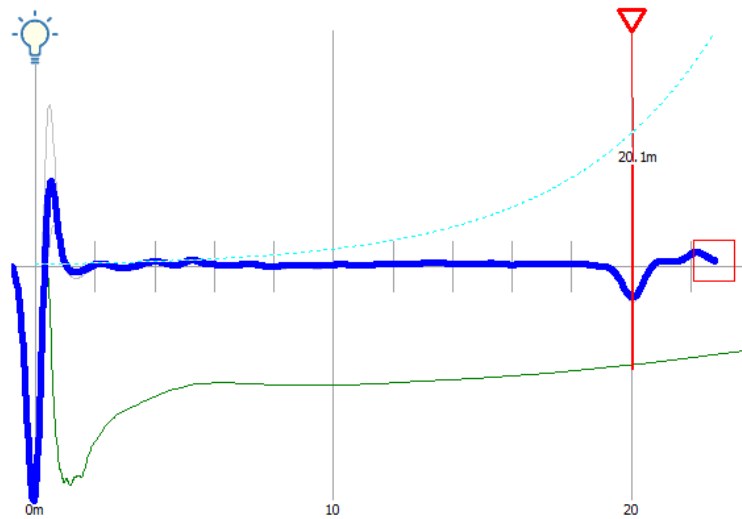


Gráfico 3-30 REFLECTOGRAMA DEL PILOTE 4 DEL ESTRIBO 2
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Interpretación: Se muestra una curva de eco según la clasificación de CIRIA de señal tipo 1 que no presenta anomalías en el reflectograma, lo que permite deducir la existencia de un pilote integro sin presencia de heterogeneidades con una longitud similar a la esperada y cuya punta esta empotrada en roca o suelo duro (lutita).

Con base en los resultados de los ensayos de integridad estructural realizados en los pilotes que son la base de la cimentación del Puente Peatonal de Muisne, se evidencia que no existe presencia de anomalías en los reflectogramas, lo que indica la ausencia de heterogeneidades en cada uno de los pilotes que conforman los estribos y pilas del puente.

Los coeficientes de seguridad se pueden optimizar en el caso de que se realicen este tipo de ensayos en una muestra significativa del grupo de pilotes que conforman una estructura, tal como se indica en cada una de las normativas expuestas en los apartados anteriores.

Por lo que en nuestro caso de estudio al haberse realizado el ensayo al 100% de los pilotes que conforman las pilas y estribos del puente, es posible determinar valores máximos de factores de seguridad para la condición más desfavorable y valores mínimos de factores de seguridad para la condición más favorable, lo que permitirá obtener mediante un análisis estadístico el valor de factor de seguridad con la mayor probabilidad de falla.

Para determinar el factor de seguridad con la mayor probabilidad de falla se ha establecido la utilización del Método PERT o Método de los tres valores, debido a que presenta una distribución beta triangular con una probabilidad del 50% obtenida a partir de tres datos: el valor pesimista, el valor más probable y el valor optimista.

$$FS = \frac{P + 4MP + O}{6}$$

Para nuestro caso de estudio se ha escogido los valores referenciales que permiten las normativas europeas al reducirse las incertidumbres ocultas en el diseño y ejecución de la cimentación, debido a que la Norma Ecuatoriana de la Construcción no especifica los valores a utilizarse en el caso de realizarse este tipo de ensayos.

En el diseño de la cimentación del Puente Peatonal de Muisne se utilizó el factor de seguridad de 3 al cual lo vamos a considerar nuestro valor pesimista, mismo que recomienda nuestra normativa y engloba una serie de incertidumbres que entrañan las cimentaciones profundas.

El valor más probable será el que estipula la Normativa francesa sobre pilotes (DTU 13.2) y el capítulo de Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM 0.5-05) de la Normativa Española de Proyectos Portuarios, donde se señala que si se realizan este tipo de ensayos se podrá incrementar las cargas admisibles de los pilotes por razón estructural en un 20%, lo que resultaría para nuestro caso de estudio al considerar en los diseños un valor referencial de 3, en un valor del factor de seguridad de 2.50.

El valor más optimista será el que establece el Código Técnico de la Edificación donde se sugiere que si se realizan ensayos de integridad estructural en la totalidad de los pilotes o en una muestra significativa, las cargas admisibles por razón estructural en el diseño de los pilotes se podrán incrementar en un 25%, lo que resultaría para nuestro caso de estudio en un valor del factor de seguridad de 2.40.

$$FS = \frac{3 + (4 \times 2.5) + 2.4}{6} = 2.57 \approx 2.60$$

Finalmente, el análisis probabilístico realizado utilizando el Método PERT o Método de los tres valores permitió determinar el valor de 2.60 para el factor de seguridad en el diseño de la cimentación del Puente peatonal de Muisne, siempre que los ensayos de integridad estructural realizados en la totalidad de los pilotes confirmen la calidad de los mismos, es decir, siempre que estos no presenten defectos tal como se evidencia en el Gráfico 3-32.

Número de pilotes ensayados del total de pilotes del Puente peatonal de Muisne.



Gráfico 3-31 Gráfico estadístico del número de pilotes ensayados del total de pilotes del Puente peatonal de Muisne.
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Resultados de los ensayos de integridad estructural en los pilotes del Puente peatonal de Muisne.

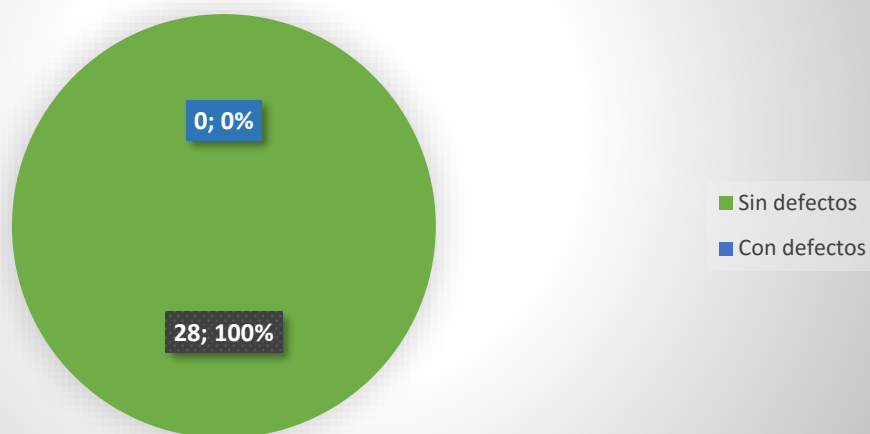


Gráfico 3-32 Gráfico estadístico de los resultados de los ensayos de integridad estructural en los pilotes del Puente peatonal de Muisne.
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Número de pilotes ensayados según la medida de su diámetro.

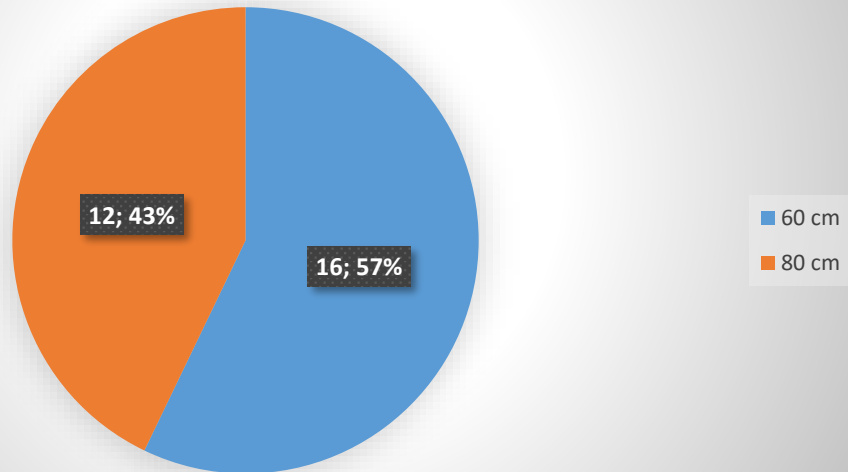


Gráfico 3-33 Gráfico estadístico del número de pilotes ensayados según la medida de su diámetro.
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Número de pilotes ensayados según la medida de su longitud.

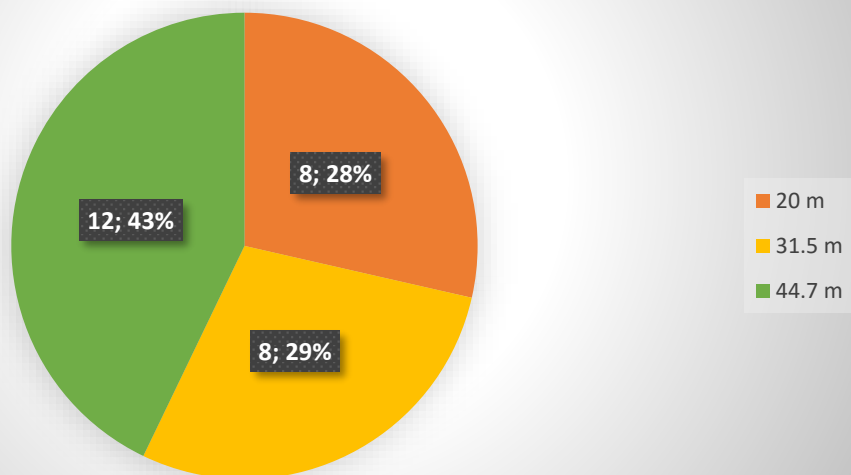


Gráfico 3-34 Gráfico estadístico del número de pilotes ensayados según la medida de su longitud.
Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Número de pilotes ensayados según la edad del hormigón al momento del ensayo.

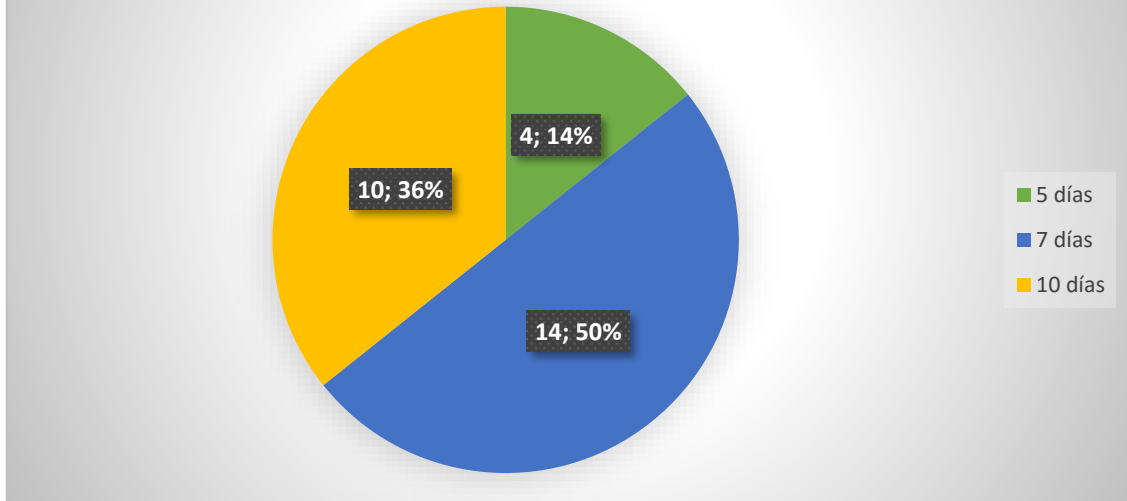


Gráfico 3-35 Gráfico estadístico del número de pilotes ensayados según la edad del hormigón al momento del ensayo.

Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

Diversos autores recomiendan que para la realización del ensayo el pilote debe haber alcanzado una edad mínima de siete días de manera que se alcance el grado de endurecimiento del hormigón que permita garantizar que la onda se propague a lo largo del fuste, aunque en nuestro estudio realizamos ensayos a edades de cinco, siete y diez días tal como se muestra en el Gráfico 3-35, alcanzando resultados muy satisfactorios a edades más tempranas que la recomendada.

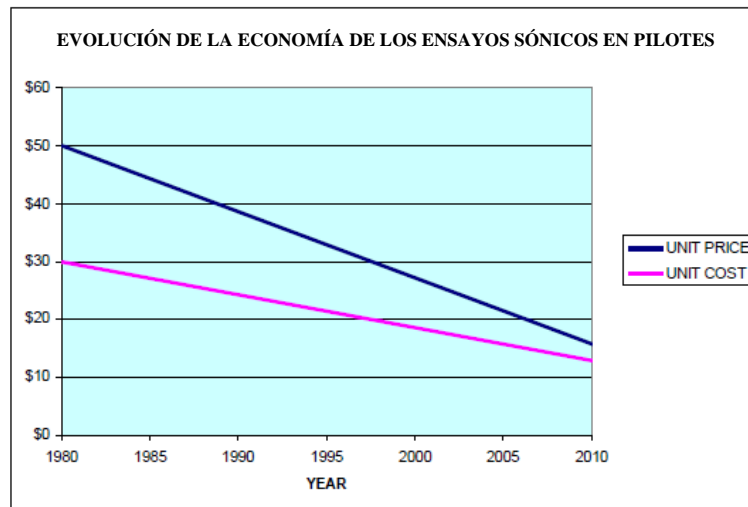


Gráfico 3-36 EVOLUCIÓN DE LA ECONOMÍA DE LOS ENSAYOS SÓNICOS EN PILOTES.

Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

PRECIO UNITARIO DEL ENSAYO SÓNICO POR PILOTE	
COSTO UNITARIO (4 PILOTES)	\$ 65
ALOJAMIENTO	\$ 20
AYUDANTE	\$ 30
ALIMENTACIÓN	\$ 10
ALQUILER DE BOTE	\$ 15
TRANSPORTE	\$ 40
PRECIO UNITARIO (4 PILOTES)	\$ 180
PRECIO UNITARIO POR PILOTE	\$ 45

* El precio unitario del ensayo se calculo considerando que en cada visita se ensayaban cuatro pilotes correspondientes a un encepado de una pila o estribo.

Tabla 3-1 Precio unitario del ensayo sónico por pilote en el diseño de la cimentación del Puente peatonal de Muisne.

Elaborado por: Josue Zumba, Abril 2017

El costo de estos ensayos en los últimos treinta años se ha reducido gradualmente según se indica en el Gráfico 3-36, debido a un crecimiento lineal de la de demanda de estos ensayos conjuntamente con el desarrollo tecnológico que permite una mayor calidad en los resultados, pero principalmente por la reducción significativa de los coeficientes de seguridad que admiten los códigos y normas internacionales permitiendo una reducción en el costo de la cimentación. El costo total de los ensayos de integridad estructural realizados en los veintiocho pilotes que son la base de la cimentación del Puente peatonal de Muisne, tal como se indica en la Tabla 3-1 fue de \$ 1260 lo que evidentemente implica en un abaratamiento en el costo de la cimentación en un nivel muy superior al costo total de la realización de los ensayos.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El ensayo de integridad debe ser un elemento de inspección que si es necesario se tendrá que completar con investigaciones complementarias que se indicarán en el informe, por lo que no es un árbitro final para decir si está bien o mal un pilote.
- Los ensayos de integridad estructural reducen o eliminan las incertidumbres propias de las cimentaciones profundas, permitiendo reducir los factores de seguridad utilizados en el diseño y consecuentemente reducir el costo de la cimentación.
- Si el registro es claro y se puede comparar la polaridad de la onda reflejada con la de la onda inicial se puede distinguir si la punta esta empotrada o no, o si el reflejo lo produce una anomalía que aumenta o reduce la impedancia.
- La limitación en esbeltez hace que generalmente no se puedan ensayar micropilotes con estas técnicas ya que al tener diámetros muy pequeños rápidamente queda limitada la profundidad de investigación.
- En pilotes en terrenos arcillosos duros la limitación de esbeltez es producida debido a que la arcilla se adhiere firmemente al pilote, lo que facilita la disipación de la onda hacia el suelo circundante.
- La punta del pilote no podría ser observada claramente en la curva del Eco si los pilotes están empotrados en una roca compacta que tenga características similares de impedancia acústica como el hormigón, debido a que no existiría cambio de rigidez entre los dos materiales.
- Diversos autores recomiendan que para la realización del ensayo, el pilote debe haber alcanzado una edad mínima de siete días de manera que se alcance el grado de endurecimiento del hormigón que permita garantizar que la onda se propague a lo largo del fuste, aunque en nuestro estudio realizamos ensayos a edades de cinco, siete y diez días alcanzando resultados muy satisfactorios a edades más tempranas que la recomendada.

- Generalmente se piensa que si se realiza la excavación y el hormigonado con camisa perdida, los pilotes estarán exentos de defectos; esto no es del todo cierto, debido a que pueden existir problemas en la calidad del hormigón, pero de lo que sí se puede estar seguro es de que reducen significativamente los riesgos de la presencia de defectos en los pilotes, tal como se evidencia en los pilotes del puente peatonal de Muisne que no han presentado anomalías en los reflectogramas, debido en parte a que han sido ejecutados con camisa recuperable, pero sobre todo, a la calidad del hormigón.
- Establecer un análisis totalmente automatizado de los resultados de estos ensayos resultaría bastante complejo, debido al gran número de causas que pueden provocar variaciones de impedancia.
- El análisis será cualitativo y por comparación con otros pilotes ensayados anteriormente en función del criterio del ingeniero que interpreta los resultados.
- Hay fallos que no se pueden considerar como defectos porque afectan en menor grado a la cimentación, debido a que los factores de seguridad utilizados permiten que la presión de trabajo se encuentre dentro de los valores admisibles.
- De los resultados no se puede extraer directamente que pequeñas variaciones de impedancia serán fatales para el comportamiento del pilote. El ingeniero deberá juzgar la aceptabilidad de los pilotes con heterogeneidades, considerando otros factores como la redistribución de cargas en pilotes adyacentes, transferencias de cargas al terreno por encima de la heterogeneidad, coeficientes de seguridad adoptados y requerimientos reales de carga de la estructura sobre los pilotes.
- No puede exigirse precisión en la medida de la longitud del pilote debido a que para el cálculo se supone una velocidad de propagación de las ondas entre 3500 y 4000 m/s, pero como se puede observar en los resultados de los reflectogramas de cada uno de los pilotes que conforman el Puente peatonal de Muisne, la longitud calculada es similar a la longitud esperada.
- El ensayo de Eco permite analizar si el elemento se encuentra en una situación de empotramiento en punta o de pilote libre, por lo que se pudo confirmar que los pilotes de las pilas centrales del Puente peatonal de Muisne se encuentran empotrados en roca o suelo duro (lutita).

- El análisis probabilístico realizado utilizando el Método PERT o Método de los tres valores permitió determinar el valor de 2.60 para el factor de seguridad en el diseño de la cimentación del puente peatonal de Muisne, siempre que los ensayos de integridad estructural se realicen en la totalidad de los pilotes para confirmar la calidad de los mismos, es decir, para verificar que no existan defectos en los elementos.
- Hasta la fecha no existe en Ecuador ningún documento normativo que regule la ejecución e interpretación de estos ensayos, a pesar de que permiten verificar la continuidad del fuste y la resistencia mecánica del hormigón.
- Se recomienda que el constructor proporcione todos los datos requeridos en el formato propuesto, para realizar una adecuada interpretación de los resultados obtenidos y establecer las posibles causas que provocaron los defectos detectados.
- Se recomienda que el informe no se limite a una descripción de los defectos detectados, sino que además trate de precisar las causas que los provocaron.
- No se recomienda utilizar esta técnica para obtener información sobre la capacidad portante del pilote, ya que sería arriesgado obtener conclusiones sobre este aspecto.
- No se recomienda realizar ensayos de Eco cuando ya están ejecutados en obra los encepados y/o vigas de atado debido a que se producen reflexiones y amortiguamientos intermedios en estos elementos instalados sobre la cabeza de los pilotes, en su lugar, se pueden realizar ensayos de sísmica paralela o ensayos de ultrasismicidad que sirven también para la investigación de pilotes con patologías.

BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN STANDARDS FOR TESTING AND MATERIAL. “Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations”, ASTM D 5882-16
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE), “Design of Pile Foundations”. Nueva York, 1993.
- Arnau Rodríguez, J. M., Fernández Tadeo, C. y Correa Lloreda, L. “Ensayo de control de integridad en pilotes”. Cimbra, enero 1993.
- BAKER ET AL. Use of nondestructive testing to evaluate defects in drilled shafts: Results of FHWA research. TRB, 1991.
- Benatov, B., Faraco, C. y Nouet, A. Aplicación de métodos no destructivos en los controles de cimientos profundos. Laboratorio de Geotecnia del Cedex, Ministerio de Fomento, 2006.
- CIRIA Report 144. Integrity testing in piling practice, 1997.
- Deep Foundations Institute, “Manual for Non Destructive Testing and Evaluation of Drilled Shafts”, USA, 2005.
- Fernández Tadeo, C. “Técnicas modernas para el ensayo de pilotes y cimentaciones profundas”. Cuaderns d’ estructures, Barcelona, 2000.
- Ministerio de la Vivienda. “Código Técnico de la Edificación, Documento Básico SE-C Cimentaciones”. Madrid, 2006.
- Paquet, J. Pile integrity testing/the CEBT reflectogram. Piling Europe, 1992.
- PUERTOS DEL ESTADO. “Recomendaciones geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias”. ROM 0.5-05.
- Sánchez Domínguez, F. y otros. “Recomendaciones para la interpretación y ejecución de ensayos de integridad en pilotes y pantallas in situ”. Laboratorio de Geotecnia del Cedex, Ministerio de Fomento, 2006.
- Sánchez Salinero, I. Métodos no destructivos para la detección de defectos de cimentaciones profundas. Revista Carreteras.