



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

PRUEBAS DE INTEGRIDAD EN PILAS MEDIANTE SÍSMICA DE REFLEXIÓN

TESIS

Que para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN GEOTECNIA

Presenta:

JESSICA MONTSERRAT ROMERO TELLEZ

Asesor de tesis:

M.I. ARACELI AGUILAR MORA

Coasesor de tesis:

DRA. SILVIA RAQUEL GARCÍA BENÍTEZ

Puebla, Pue.

Junio 2016



BUAP

"60 Aniversario de la Autonomía Universitaria"

OFICIO SIEP No. 469/2016

ING. JESSICA MONTSERRAT ROMERO TÉLLEZ

Maestría en Ingeniería, Opción terminal Geotecnia
Presente.

El suscrito M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **"PRUEBAS DE INTEGRIDAD EN PILAS MEDIANTE SÍSMICA DE REFLEXIÓN"**, para obtener el grado de Maestra en Ingeniería con opción terminal en Geotecnia. Assignándose como Asesor de Tesis a la M.I. Araceli Aguilar Mora y Co-Asesor a la Dra. Silvia Raquel García Benítez.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Pensar bien, para vivir mejor"

Puebla, Puebla a 02 de febrero de 2016

M.I. EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO
Director de la Facultad de Ingeniería



C.c.p. M.I. Araceli Aguilar Mora. Asesor tema tesis.

C.c.p. Dra. Silvia Raquel García Benítez. Co-Asesor tema de tesis.

C.c.p. Archivo

GJS/MFC/dsm.

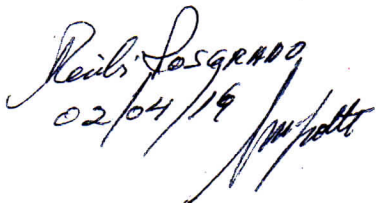
Puebla, Pue., a 1 de abril de 2016

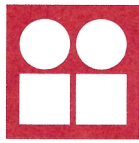
M. I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de Ingeniería
Presente

Por este medio le informo que después de haber revisado y solicitado las correcciones pertinentes relacionadas a la tesis denominada "**Pruebas de integridad mediante sísmica de reflexión**" elaborada por la Ing. Jessica Montserrat Romero Téllez para obtener el grado de Maestra en Ingeniería con opción terminal en Geotecnia, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.


Atentamente
M. I. Araceli Aguilar Mora
Asesora de la tesis

c.c.p. Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado
c.c.p. Archivo


02/04/16



INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM

Ciudad de México a 14 de marzo de 2016

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE INGENIERÍA
M.I. EDGAR VILLAGRÁN ARROYO
DIRECTOR

Por este conducto me dirijo a usted para informarle que **Jessica Montserrat Romero Téllez** ha concluido satisfactoriamente el desarrollo de su trabajo de tesis titulado: **"PRUEBAS DE INTEGRIDAD EN PILAS MEDIANTE SÍSMICA DE REFLEXIÓN"** para obtener el grado de Maestra en Ingeniería con opción terminal en Geotecnia, cumpliendo con lo indicado en el formato requerido por su institución. El trabajo ha sido revisado y avalado por mí, fungiendo como su co-asesora, por lo que solicito su autorización para imprimirlo.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

DRA. SILVIA RAQUEL GARCÍA BENÍTEZ
INVESTIGADORA DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

Ccp. Dr. Gabriel Jiménez Suárez. Secretario de Investigación y Estudios de Posgrado Facultad de Ingeniería

Ccp. M.I. Miguel Ángel Figueras Corte. Coordinador de la Maestría en Ingeniería con opción terminal en Geotecnia

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Mtra. Araceli Aguilar Mora, a la Dra. Silvia Raquel García Benítez y al Ing. Sergio Benigno Paredes por su colaboración, revisión e información brindada para la correcta conclusión del presente trabajo de investigación.

CONTENIDO

RESUMEN	IV
INTRODUCCIÓN	V
Justificación	vi
Objetivos	vii
Antecedentes	viii
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	1
1.1 Mecanismo de propagación de ondas	2
1.2 Reflexión y Refracción de ondas.....	6
1.3 Prospección sísmica de reflexión	7
1.4 Propagación de ondas P en el concreto	8
1.5 Pruebas de integridad mediante métodos sísmicos	10
1.5.1 Ultrasonido (<i>Ultrasonic Pulse</i>)	11
1.5.2 Pulso sísmico (<i>Pulse-echo</i>)	15
1.5.3 Impacto sísmico (<i>Impact-echo</i>).....	17
CAPÍTULO 2. INSPECCIÓN DE PILAS MEDIANTE SÍSMICA DE REFLEXIÓN.....	24
2.1 Procedimiento general.....	24
2.2 Ultrasonido	25
2.3 PET (<i>Pile echo tester</i>).....	28
2.3.1 Instrumentación.....	28
2.3.2 Adquisición	29
2.3.3 Procesamiento e Interpretación.....	31
2.4 Reflexión sísmica (<i>Sonic echo</i>)	35
2.4.1 Instrumentación.....	36
2.4.2 Adquisición	37
2.4.3 Procesamiento e Interpretación.....	39

CAPITULO 3. CASO PRÁCTICO: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.....	45
3.1 Sitio “A”	47
3.2 Sitio “B”	51
3.3 Discusión de resultados.....	75
CAPÍTULO 4. MAPAS DE RECURRENCIA EN LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS DE INTEGRIDAD EN PILAS	77
4.1 Mapas de Recurrencia.....	78
4.2 Recurrencias e Integridad	82
4.3 Lectura de Recurrencias.....	84
CONCLUSIONES	91
REFERENCIAS	96
ANEXOS	A
A. TEORÍA DE ELASTICIDAD Y LEY DE HOOKE	
B. TEORÍA DE PROPAGACIÓN DE ONDAS	
C. IMPEDANCIA Y COEFICIENTES DE REFLEXIÓN – REFRACCIÓN	
D. CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DEL REFLECTOR	
E. DURACIÓN DE PULSO (“TIEMPO DE CONTACTO”)	
F. SONDEOS EXPLORATORIOS	
G. TABLAS DE INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN POR PILA	

RESUMEN

Las pilas y pilotes son esenciales en las cimentaciones profundas, además de su indiscutible papel como elemento de soporte, la construcción de este tipo de cimentación representa esfuerzos y costos significativos sobre el importe total de cualquier obra civil por lo que la necesidad de evaluar sus condiciones in situ, mediante pruebas de integridad que no afecten a su estructura, resulta imperiosa. Las mejores alternativas correlacionan métodos geofísicos y geotécnicos para conseguir los objetivos. En este trabajo se aborda una metodología que toma ventaja de algunas técnicas de la sísmica de reflexión y se explora de forma inédita una alternativa para analizar e interpretar las series de tiempo resultado de las pruebas (procedimiento que usa conceptos de la teoría del caos, específicamente mapas de recurrencia MR) reduciendo las incertidumbres asociadas a interpretaciones sesgadas o parciales. Con la finalidad de contribuir a la solución de esta demanda a la vez que se incrementa el estado del arte sobre el tema.

ABSTRACT

Piles are essential in deep foundations, as well as its undisputed role as a support, the construction of such foundations represents efforts and significant costs on the total amount of any civil work, so it is very important to evaluate their in situ conditions by integrity tests that do not affect its structure. The best alternatives combined geophysical and geotechnical methods to achieve the objectives. The geophysical method has recently been used for the inspection a piles is the seismic reflection. The seismic reflection is non-destructive non-invasive and rapid acquisition technique, it has been approved by the engineering community as an appropriate tool for inspection. This paper presents a methodology based on the advantage of some techniques of seismic reflection and an unprecedented alternative to analyze and interpret time series obtained from the tests (the method using concepts of chaos theory, specifically recurrence plot RP) reducing the uncertainties associated with partial or biased interpretations. In order to contribute to the demand while the state of the art in the subject increases.

INTRODUCCIÓN

Las cimentaciones profundas como soporte a estructuras que debido a su forma, carga impuesta y condiciones geotécnicas / geológicas del medio, no puedan ser asentadas a nivel superficial, han sido empleadas e intensamente estudiadas desde hace siglos. La primera referencia al empleo de pilas fue dada por Heródoto "el padre de la historia" (escritor y viajero griego del siglo IV a.C.) y se ha documentado que civilizaciones antiguas como la Egipcia, Griega, Romana, China y Mesopotámica, implementaron el uso de pilas para sus edificaciones; asimismo, históricas ciudades como Venecia y Ámsterdam aún tienen evidencias de haber sido fundadas sobre pilas (Hussein & Goble, 2004).

En la actualidad las pilas y pilotes siguen siendo esenciales en las cimentaciones profundas, sin embargo, los problemas que pueden quedar ocultos i) durante su colado o hincado (fracturas, derrumbes de las paredes laterales, contaminación del concreto con lodos, cambios no planeados de la sección transversal, por ejemplo) o ii) por fenómenos geológicos posteriores a su construcción (deslizamientos, sismos y hundimientos) pueden producir daños a la estructura con consecuencias desastrosas (colapso o falla) que obligan a costosas reparaciones o incluso a recimentaciones completas.

Además de su indiscutible papel como elemento de soporte, la construcción de este tipo de cimentaciones representa esfuerzos y costos significativos sobre el importe total de cualquier obra civil por lo que la necesidad de evaluar sus condiciones in situ, mediante pruebas de integridad que no afecten a su estructura, resulta imperiosa.

En este trabajo de tesis se describen algunas técnicas empleadas como pruebas de integridad, abordando alternativas de exploración e interpretación basadas en el método de sísmica de reflexión y explora de forma inédita una alternativa para analizar e interpretar las series de tiempo resultado de las pruebas (procedimiento que usa conceptos de la teoría del caos, específicamente mapas de recurrencia MR) reduciendo las incertidumbres asociadas a interpretaciones sesgadas o parciales. El método es *transparente* lo que permite establecer las ventajas y limitaciones de su uso, con la finalidad de contribuir a la solución de esta demanda a la vez que se incrementa el estado del arte sobre el tema.

Justificación

En el control de calidad de pilas y pilotes, como cimentaciones terminadas, es importante evaluar los métodos disponibles para este efecto y reconocer aquellos que permiten obtener la mayor información del elemento con la menor ambigüedad posible y al menor costo. Las mejores alternativas correlacionan métodos geofísicos y geotécnicos para conseguir los objetivos, sin embargo, esto no se alcanza en buena medida por la falta de experiencia o conocimiento (en una u otra área) del usuario o diseñador.

El método geofísico que se ha empleado hasta la actualidad para la inspección de pilas y pilotes es el de sísmica de reflexión. Como técnica no invasiva, no destructiva y de rápida adquisición, tiene la aprobación de la comunidad ingenieril como herramienta adecuada para la inspección, sin embargo, la información empírica que se tiene a nivel nacional es muy escasa y con calidades muy heterogéneas.

En este trabajo se aborda una metodología que toma ventaja de algunas técnicas de análisis de datos para reducir las incertidumbres asociadas a criterios de interpretación sesgados o parciales y dar resultados eficientes en el análisis de la velocidad de propagación de la onda de compresión para definir las condiciones de las cimentaciones profundas.

Es importante establecer las ventajas y limitaciones del método de sísmica de reflexión como prueba de integridad. Posteriormente definir los pasos de la propuesta de análisis de señales en el dominio del tiempo, y por último presentar ejercicios de aplicación de esta metodología con el propósito de establecer los criterios para encontrar propiedades cualitativas y cuantitativas que caracterizan la respuesta para cimentaciones con / sin defectos.

Objetivos

Determinar la calidad y profundidad de las pilas de cimentación mediante i) el ensaye de sísmica de reflexión y ii) la interpretación caótica de las series resultado.

Objetivos Específicos:

- Describir tres técnicas de sísmica de reflexión y su aplicación como pruebas de integridad.
- Definir la metodología de interpretación de pruebas de integridad con Mapas de Recurrencia.
- Establecer criterios para detectar respuestas características de pilas con / sin defectos.
- Identificar las ventajas y limitaciones de la metodología propuesta para la inspección de pilas.

Antecedentes

La prospección sísmica es una poderosa herramienta de investigación que ha tenido un amplio desarrollo sobre todo en la exploración geológica ya que con ella se puede inspeccionar, con buena resolución, los primeros metros del terreno (sísmica de alta resolución o sísmica superficial). Este instrumento emplea ondas elásticas que se propagan a través del terreno y que han sido generadas artificialmente mediante una fuente de energía mecánica adecuada (martillo manual, generador de impactos, etc.).

Una vez que la carga dinámica impacta al cuerpo elástico se inicia la propagación de ondas de esfuerzos (de compresión P y de corte S) y se registran los arribos de estas ondas en una serie de estaciones sensoras (geófonos) distribuidas sobre el terreno. Debido a que la velocidad de propagación de las ondas en el terreno es distinta para cada tipo de material, a partir del estudio de las distintas formas de onda y sus tiempos de trayecto, se consigue obtener información del subsuelo que luego se correlaciona con las capas geológicas (específicamente con la velocidad de ondas de compresión se definen los espesores).

Las ondas producidas por el impacto se propagan en todas direcciones y cuando encuentran un cambio en las propiedades elásticas del material, como es el caso de una interfaz entre dos capas geológicas, parte de la energía continúa en el mismo medio, parte se refleja y el resto se transmite al otro medio con cambios en la dirección de propagación, en la velocidad de propagación y en el modo de vibración. De este hecho nace la diferencia fundamental entre los métodos de refracción y reflexión.

A diferencia de la sísmica de refracción donde sólo se registran los primeros tiempos de arribo de la onda, en la sísmica de reflexión se analiza toda la traza (tiempo de ida y de vuelta) de la energía sísmica registrando las amplitudes y los tiempos de llegada de las ondas reflejadas en las diversas interfaces del medio en estudio.

Con base en los principios de la sísmica de reflexión superficial y haciendo una analogía entre el subsuelo y una pila (considerados como el medio de propagación), se pueden evaluar las discontinuidades del concreto como una interfaz entre dos capas (materiales) geológicas.

Las pruebas de integridad en pilas y pilotes son ensayos indirectos no destructivos fundamentados en la sismica de reflexión. Las bases sobre estas técnicas fueron desarrolladas por Isaacs (1931), en su publicación seminal propone la aplicación de la teoría de ondas de esfuerzos para el análisis de pilas. Las memorias de la Primera Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones (junio de 1936, Universidad de Harvard en Cambridge, Massachusetts, EE.UU.) contienen un artículo en el que se propone una nueva fórmula para la determinación de la profundidad de una pila mediante un golpe de martillo en el cabezal, considerando las ondas elásticas producidas por el impacto (Kanschin & Plutalow, 1936).

En enero de 1940 la revista de la Sociedad de Ingenieros Civiles de Boston publicó un documento elaborado por A. E. Cummings (1940) en el cual se demuestra matemáticamente la coherencia del método de análisis de onda de esfuerzo para la solución del impacto longitudinal en pilas, tema debatido y estudiado profundamente por Karl Terzaghi (1943). Se recomienda al lector interesado en los detalles sobre las bases de esta técnica consultar Hussein & Goble (2004).

A través de numerosos datos experimentales sobre resistencia a la compresión y velocidad de propagación de las ondas P en el concreto, se ha establecido una clasificación para el uso de dicha velocidad, como un indicador de calidad del concreto (Whitehurst, 1967). Leslie (1949), propuso un método para medir la velocidad de los impulsos generados mecánicamente a través del concreto que tarda más de quince años en convertirse en un método de ensayo aplicable (Nawy, 2008).

Los análisis modernos trabajan con la propuesta de Isaac (aplicación de la ecuación de onda unidimensional en el hincado de pilotes) y la formulación numérica de Smith (1960), primera aplicación con computadoras digitales. Los siguientes avances se encaminan al desarrollo de mejores metodologías de medición de ondas y de solución de la ecuación de onda (Rausche, 1970; Paquet, 1968 y otros avanzan en la inclusión de la prueba estática de carga (Paikowsky, 2015))

Achenbach (1973) demostró la física de la propagación de la onda elástica en sólidos mediante la derivación de las ecuaciones de onda, la mecánica de materiales y ecuaciones de movimiento. Cheng y Sansalone (1993) expusieron la coherencia de una serie de mejoras a las ideas de Achenbach.

Su propuesta se conoce como impacto sísmico y se orienta principalmente hacia la evaluación no destructiva del concreto, ellos realizaron pruebas experimentales y análisis de mediciones de respuestas de varios escenarios de defectos internos, demostrando que la respuesta depende en gran medida de las propiedades de cada defecto pero también de la ubicación de la fuente y el receptor con respecto al defecto.

Por otro lado, existen trabajos que incluyen las propiedades del concreto para identificar con precisión la profundidad de una anomalía (Popovics & Cano, 2007, vea (Abramo, 2011)).

El gran interés de la comunidad científica en este tema se pone en evidencia a través de la serie de conferencias dedicadas a estas pruebas, con metódico seguimiento de la historia, criterios y equipos. Sin duda la apropiada documentación de las conferencias, que arrancaron con el Seminario Internacional Sobre la Aplicación de la Teoría de Ondas Elásticas a Pilas (Estocolmo, Suecia, 1980) y su más reciente presentación en Japón en el 2012 bajo el nombre 9a Conferencia Internacional Sobre la Teoría de Ondas Elásticas y Ensayos a Cimentaciones Profundas, han permitido conseguir una base de datos (no totalmente dispuesta, pero existente) de más de dos millones de pruebas dinámicas en pilas realizadas en todo el mundo. Estas obras de referencia son la columna vertebral de la literatura sobre este tema, y demuestran la aceptación y la aplicación en todo el mundo de la eficacia de estos métodos.

En la actualidad, cuando las pruebas de integridad mediante métodos sísmicos son aplicadas a pilas y pilotes generalmente se le denomina “Prueba de Integridad de Baja Deformación” (Chernauskas, 2005). A partir de este sistema se han desarrollado técnicas de interpretación que permiten determinar, de forma indirecta, la calidad y profundidad de la pila mediante el análisis de la velocidad, aceleración de las ondas de compresión P y la impedancia.

Los registros obtenidos de los ensayos antes mencionados, comúnmente se analizan en el dominio de la frecuencia o en el del tiempo para obtener la profundidad a la que se encuentre un cambio de interfaz en el concreto proveniente de defectos (huecos y laminaciones), cambios en las propiedades elásticas del concreto y medio - base de la pila.

El análisis del tiempo y de la frecuencia son dos métodos de solución con respecto al tiempo, de la ecuación de movimiento. La ecuación de movimiento, rige la vibración de un cuerpo y es una ecuación diferencial parcial con respecto al espacio y tiempo, por lo tanto, se resuelve en contra de ambas variables (Nozomu, 2015).

En el dominio del tiempo se resuelve mediante el esquema de integración paso a paso de tiempo, representando la señal en términos de amplitud y muestra como es distribuida en función del tiempo (Boashash, 2003).

Lo que sucede en el dominio del tiempo puede ser representado en el dominio de la frecuencia, mediante la transformación de Fourier. La transformada de Fourier es una función de valores complejos que muestran la manera en que la energía de la señal es distribuida en función de la frecuencia (Boashash, 2003).

En esta investigación se explora, de forma inédita, una alternativa para analizar e interpretar las series de tiempo resultado de las pruebas. Mediante el uso de la teoría del Caos y una de sus herramientas, específicamente los mapas de recurrencia MR, se ofrece a la comunidad científica una vertiente ventajosa en el estudio de señales que provienen de sistemas no lineales y de alta dimensión.

Los MR son visualmente llamativos, favorables en la búsqueda de correlaciones ocultas en datos muy complejos que se expresan a través de un vector 1D, no demandan la estacionalidad en las series de tiempo y son particularmente útiles en el análisis de sistemas cuya dinámica podría estar cambiando. Un mapa contiene estructuras a “pequeña” escala (puntos, líneas diagonales, verticales y horizontales) que se asocian a ciertos comportamientos o características propias de ventanas en la señal. Un mismo MR despliega estructuras a “gran” escala, también llamada textura, que puede ser visualmente caracterizada como homogénea, periódica, con derivaciones o interrumpida y esto puede dar indicaciones directas y concretas sobre la dinámica del sistema que generó la señal (Eckmann *et al.*, 1987).

Con el uso de los MR y la interpretación de sus estructuras, en este trabajo de tesis se intenta auxiliar en la solución de conflictos en la interpretación de pruebas de integridad sin involucrar técnicas de análisis prohibitivas, subjetividad, simplificaciones excesivas o criterios poco científicos.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La prospección sísmica consiste en la emisión y recepción de ondas elásticas que se propagan en un medio heterogéneo. La incidencia de esta energía en las heterogeneidades del medio provoca fenómenos de reflexión, refracción y pérdidas de la energía y es a través de estos fenómenos que se detectan los cambios en las propiedades elásticas de los materiales del subsuelo, conocido el hecho de que la propagación de la energía por el medio depende de sus propiedades elásticas y su densidad (Gayá, 2004).

Los métodos sísmicos de prospección requieren de una energía generadora de ondas elásticas que se propaguen por el medio en estudio. La fuente de energía puede ser explosivos o medios mecánicos (según la profundidad requerida) y su elección depende si la resolución requerida es para los primeros metros del terreno (sísmica de alta resolución o sísmica superficial) o a varios kilómetros de profundidad (sísmica profunda). Así, para la sísmica profunda se utilizan fuentes de energía muy potentes (explosivos o camiones vibradores) capaces de generar ondas elásticas que llegan a las capas profundas del subsuelo, mientras que para la sísmica de alta resolución se utilizan martillos de impacto, rifles sísmicos y explosivos de baja energía.

El comportamiento y la trayectoria de las ondas, que se propagan a partir de la generación de ondas sísmicas artificiales (impactos o vibraciones) en o cerca de la superficie, se puede reconstruir observando su tiempo de llegada en estaciones de observación superficial (geófonos) alineadas a lo largo de un perfil y relacionando la velocidad de la partículas con el tiempo. Esta es la manera en que se localiza la profundidad de las discontinuidades en el medio.

Los geófonos son la unidad en contacto directo con la superficie del medio, tiene la capacidad de transformar la deformación mecánica (producida por el impacto) en pulsos eléctricos, y así detectar la velocidad del terreno producida por las ondas sísmicas. Recibe las oscilaciones en forma de señal analógica y posteriormente se muestrea la señal para generar una serie de tiempo. Las muestras se digitalizan a través de un conversor analógico – digital (ADC), se almacenan y son mostradas en un módulo de visualización (*display*) obteniendo lo que se denomina traza sísmica (figura 1.1).

La gráfica de los tiempos de llegada de las diversas ondas registradas desde el momento de la generación de las ondas es lo que llamamos *sismogramas*.

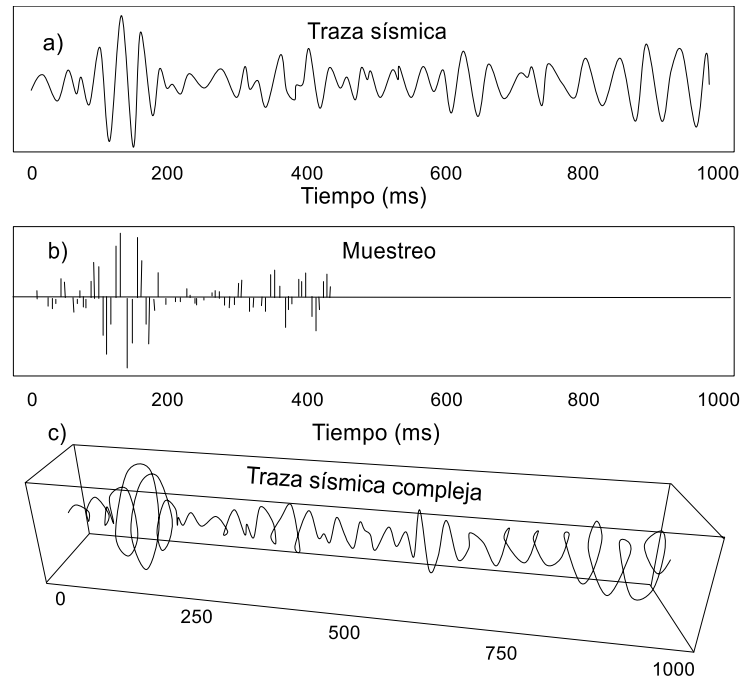


Figura 1.1 Representación gráfica de una traza sísmica. a) traza real, b) muestreo, c) traza compleja. (modificado de Costain & Coruh, 2004)

1.1 Mecanismo de propagación de ondas

Las ondas sísmicas son ondas elásticas que causan deformaciones no permanentes en el medio de propagación con una velocidad que depende de las propiedades elásticas y densidad del material. La teoría de la elasticidad de Hooke (ver Anexo A) describe a la deformación en función de la fuerza que la genera, relacionando los términos esfuerzo σ – deformación ϵ . Esta relación para un material en particular nos permite describir sus propiedades elásticas y con esto definir la velocidad y el mecanismo de propagación de la onda.

La ecuación de onda describe la propagación de la energía y la solución de esta ecuación permitió establecer la existencia de diferentes tipos de ondas: ondas internas y superficiales (figura 1.2). La relación entre las propiedades físicas de un material y su velocidad de propagación de las ondas se explica mediante la Teoría de Propagación de Ondas para un medio elástico, infinito e isotrópico (vea Anexo B).

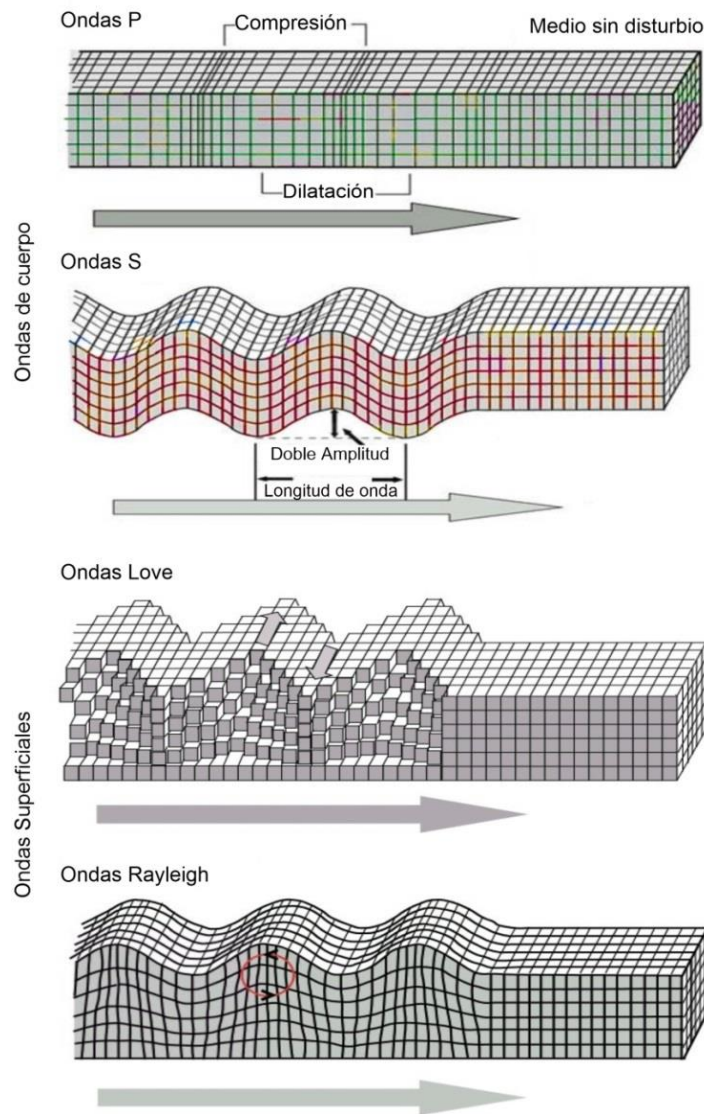


Figura 1.2 Tipo de propagación de las ondas elásticas. Ondas de Cuerpo: a) ondas de compresión P, b) Ondas de corte S. Ondas Superficiales: c) Ondas Love, d) Ondas Rayleigh.

Las ondas internas viajan a través del interior de un medio elástico y se pueden distinguir dos tipos de ellas: de compresión (ondas P) y de corte (ondas S). Las ondas P son aquellas en las que el movimiento de las partículas oscila en la misma dirección de propagación y son las primeras en arribar en un registro sísmico. Las ondas S son aquellas en las que el movimiento oscila perpendicularmente a la dirección de propagación.

Las ondas superficiales se generan por la presencia de discontinuidades en el medio y viajan paralelamente a la superficie de la discontinuidad, se clasifican en Ondas Rayleigh y Love. Las ondas superficiales son dispersivas, es decir, a diferente frecuencia presenta diferente velocidad de propagación. La velocidad de las ondas Rayleigh V_R y Love V_L es menor que la velocidad de las ondas de corte V_S siendo aproximadamente: $V_R = 0.7 V_S$ y $V_L = 0.9 V_S$. (Dobrin & Savit, 1998).

Las leyes que rigen el mecanismo de propagación de onda son (Figuroa, 1974):

- Principio de Huygens: Cada punto alcanzado por un frente de onda actúa como una nueva fuente de onda que se extiende en todas direcciones generando ondas secundarias.
- Principio de Fermat: Un rayo dado real sigue de un punto a otro aquel camino que produce el tiempo mínimo en su recorrido.
- Leyes de Reflexión y Refracción: Cuando una onda sísmica encuentra un cambio en las propiedades elásticas del material, como es el caso de una interface entre dos capas geológicas; parte de la energía continúa en el mismo medio (onda incidente), parte se refleja (ondas reflejadas) y el resto se transmite al otro medio (ondas refractadas) con cambios en la dirección de propagación, en la velocidad y en el modo de vibración (figura 1.3).
- Ley de Snell: Relaciona los ángulos de incidencia i_0 , reflexión i_1 y refracción i_2 de la onda transmitida y reflejada, con las velocidades de propagación de la onda V_S , V_P , de los medios en los que está en contacto (figura 1.3). Esta ley nos dice que si un rayo pasa de un medio de menor velocidad a otro de mayor velocidad se aleja de la normal, mientras que si pasa de un medio de mayor a otro de menor velocidad se acercará a ella.

Las ondas sísmicas internas P y S cumplen con las leyes de reflexión y refracción. Cuando $V_1 < V_2$, $i_0 > i_2$, los rayos se refractan por la segunda capa y los geófonos situados en la superficie no registran el fenómeno. El caso en el que i_2 alcanza los 90° se define como $i_1 = \sin^{-1}(V_1/V_2)$ al ángulo de incidencia crítico para el cual el rayo, llamado críticamente refractado, viaja por el medio inferior paralelamente a la interface (Born & Wolf, 1980).

La ley de Snell proporciona información sobre las trayectorias de los rayos, los tiempos de llegada y la posición de los refractores, pero no proporciona información alguna sobre las amplitudes de las ondas (Berryman, 1991).

El porcentaje de la onda incidente que es reflejada y refractada está dado por los coeficientes de reflexión y transmisión de Fresnel. Estos coeficientes cuantifican como la amplitud de la onda varía al atravesar una discontinuidad (Born & Wolf, 1980). A partir de la expresión de la impedancia se puede calcular los coeficientes de transmisión y reflexión (vea Anexo C).

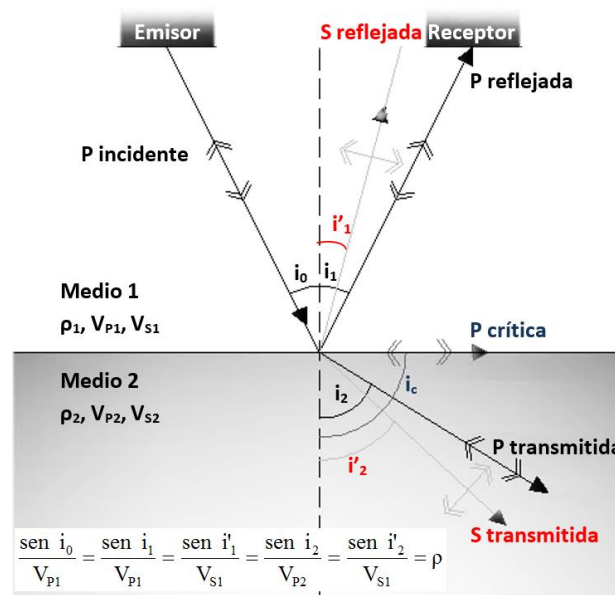


Figura 1.3. Propagación de las ondas según la ley de Snell. La cantidad de energía de las ondas incidentes se reparte entre las ondas reflejadas, las refractadas y la absorción natural del terreno.

Además de los fenómenos de refracción y reflexión, cuando la onda se propaga en medios no homogéneos se producen otros fenómenos que causan pérdidas de la energía e introducen ruido en el registro sísmico, estos son: atenuación, difracción y dispersión. El fenómeno de dispersión produce energía distribuida al azar en la superficie, observándose como ruido en el sismograma. La dispersión es la formación de pequeñas ondas que propagan la energía en todas sus direcciones; se produce cuando un frente de ondas choca con partículas libres u objetos pequeños, comparados con su longitud de onda. Este fenómeno no es dependiente de la frecuencia, es decir, no es mayor para frecuencias altas (Sato, Fehler, & Maeda, 2012).

Las ondas generadas principalmente por medio de explosiones o impactos, hacen que la deformación por corte del medio (que da lugar a las ondas de corte) sea pequeña comparada con el cambio de volumen que se produce en el mismo (que origina las ondas de compresión). Por ello la mayor parte de la energía producida lo será en forma de ondas P. Si a esto le añadimos que los geófonos empleados generalmente registran solamente la componente vertical de la vibración, el efecto de la onda transversal es tan débil que prácticamente no afecta al registro sísmico (Figueroa, 1974). Por lo anteriormente descrito, de ahora en adelante sólo consideraremos para el estudio de estos métodos sísmicos, las ondas de compresión P.

1.2 Reflexión y Refracción de ondas

El espectro de frecuencias asociado a una explosión es muy variable dependiendo de las propiedades de los materiales que rodean el punto de explosión. Cuando el impulso sísmico viaja a través de la tierra las altas frecuencias son absorbidas más rápido que las bajas frecuencias, aumentando la atenuación con la distancia y profundidad. Este es un hecho bien conocido, ya que en los registros de los terremotos a grandes distancias sólo llegan las frecuencias muy bajas.

Asimismo las frecuencias asociadas a la reflexión se mantienen en una banda que va de 20 a 100 ciclos por segundo (cps o Hz). La ausencia de energía reflejada por debajo de los 20 cps, se atribuye al hecho de que las longitudes de onda correspondientes a esta clase de frecuencias son grandes comparadas con el espesor de las capas reflejantes. Por ello la energía de baja frecuencia no sería reflejada y solamente podría llegar a la superficie por refracción. La reflexión se produce, cuando la frecuencia aumenta y las longitudes de onda se hacen comparables con las discontinuidades verticales representadas por la estratificación (Sato, Fehler, & Maeda, 2012).

A partir de este hecho nace la diferencia fundamental entre los métodos de reflexión y refracción, ya que el espectro de frecuencias reflejadas muestra la mayor amplitud en la banda de 20 a 100 Hz y el de la refractada en la de 1 a 20 Hz; por lo que los geófonos y el sistema de registro han de ser diferentes en uno y otro caso de forma que tengan la máxima respuesta a media o baja frecuencia (Dobrin & Savit, 1998).

1.3 Prospección sísmica de reflexión

En la sísmica de reflexión se debe analizar el tiempo de ida (incidencia) y vuelta (rebote) de la energía sísmica en todas las trazas, registrando las amplitudes y tiempos de llegada de las ondas reflejadas en las diversas interfaces del medio de estudio. Las reflexiones se ven en forma de lóbulos negros de mayor amplitud y definen las capas reflectoras que después se asociaran a las estructuras geológicas (figura 1.4).

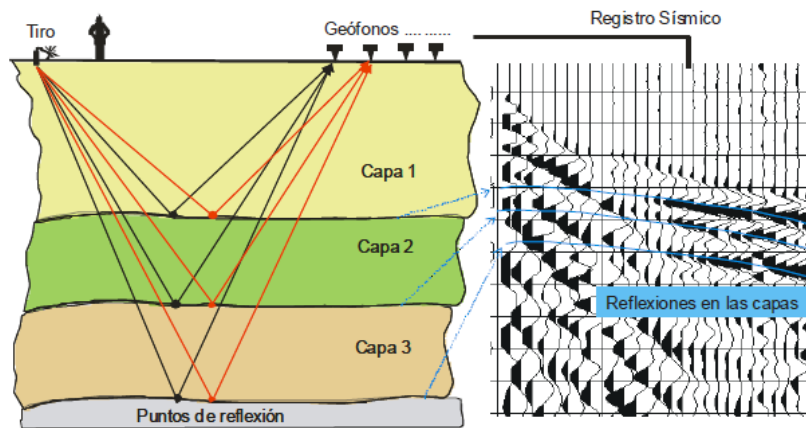


Figura 1.4. Esquema del recorrido de los rayos reflejados en tres capas para una posición de tiro y sus geófonos (Gayá, 2004).

Comúnmente los geófonos son distribuidos en el terreno mediante arreglos lineales o perfiles continuos, utilizados principalmente por su aplicación geológica y con el objetivo de observar cortes estratigráficos. Sin embargo, la industria sísmica efectuó las primeras pruebas de geometrías de adquisición circular (denominados arreglos no convencionales) en la década de los 80's. No obstante es hasta el 2006, que el personal de *WesternGeco* (Buia & Flores, 2008) demostró que esta técnica de adquisición no-convencional ofrece una mejor iluminación sísmica de subsuelo, una mejor cobertura azimutal, una relación señal-ruido más alta y un nivel mejorado de resolución sísmica en diversos ambientes geológicos complejos.

Dado que las distancias entre la fuente y los geófonos son pequeñas respecto a la profundidad de penetración que se alcanza, el dispositivo experimental soporta que se opere con un ángulo de incidencia pequeño, asegurando así la obtención de reflexiones y distinguiéndose de la sísmica de refracción. En la sísmica de reflexión de alta resolución, la elección del dispositivo experimental está muy condicionada debido a que normalmente se adquieren una traza por geófono (Sheriff & Geldart, 2002).

El tratamiento de los datos en sismica de reflexión es más laborioso y delicado que el procesado de refracción. Uno de los retos más importantes es conseguir aislar de los registros las reflexiones significativas, eliminando las otras ondas (onda directa, refracciones, ruido, etc.). Otro punto conflictivo del procesado es que en las secciones sísmicas de reflexión las capas reflectoras están en modo *tiempo doble*, debido a que cada rayo reflejado ha hecho el viaje de ida y vuelta. Para el lector interesado en el análisis de datos sísmicos se recomienda consultar Yilmaz, 2008.

1.4 Propagación de ondas P en el concreto

Científicos y tecnólogos se han interesado por décadas en determinar las propiedades del concreto a partir de métodos indirectos. A excepción de la inspección visual, el uso de métodos sísmicos y ultrasonidos son las formas más antiguas de ensayos no destructivos, a través de los cuales es posible detectar irregularidades (oquedades y fracturas) e inconsistencias en el concreto.

Whiterhurst (1967), a través de numerosos datos experimentales y de la correlación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de propagación de la onda P en el concreto, estableció una clasificación para el uso de la V_P como un indicador de calidad (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Calidad de un concreto con densidad de 2400 kg/m³ en función de la velocidad de onda P (V_P) (Whiterhurst, 1951)

Velocidad de onda P (m/s)	Calidad del concreto
Mayor a 4575	Excelente
3660 – 4575	Bueno
3050 – 3660	Regular
2135 – 3050	Pobre
Menor a 2135	Muy pobre

Como se muestra en el Anexo B, las ondas de compresión viajan más rápido en un medio infinito que en una estructura cilíndrica larga. Esto ocurre porque los desplazamientos laterales son posibles debido al efecto de contorno cilíndrico, mientras que en un medio infinito no existen límites que generen desplazamientos laterales.

Para una relación de Poisson típica del concreto (0.2 a 0.3), la velocidad de compresión V_P , en una estructura larga y delgada es de aproximadamente 5 a 15% menor que la velocidad de la onda de compresión en un medio infinito.

De forma general la velocidad de onda de compresión V_P para un concreto de buena calidad es 4000 m/s, aunque los valores típicos oscilan entre 3600 y 4400 m/s, dependiendo de la edad, condición y composición del concreto. Para concretos de mala calidad (con irregularidades) la velocidad se reduce a 2000 – 3000 m/s, de manera que las heterogeneidades se hacen evidentes (Finno, Gassman, & Osborn, 1997).

La propagación de ondas en el concreto asume que la reflexión y la refracción del frente de onda ocurren en una interfaz plana entre dos medios diferentes. Este análisis es aplicable para inconsistencias dentro del concreto. La sensibilidad de los métodos sísmicos para detectar dichas inconsistencias e irregularidades (grietas y oquedades) depende de la frecuencia de la onda propagada (longitud de onda). Como regla general para que una inconsistencia y/o irregularidad sea detectada su tamaño debe ser igual o mayor a la longitud de la onda propagada. La velocidad de la onda (V), la frecuencia (f) y longitud de onda (λ), se encuentran relacionadas mediante la siguiente ecuación:

$$V = f\lambda \quad (\text{Ecuación 1.4.1})$$

Por ejemplo, para detectar una irregularidad con un diámetro de aproximadamente 0.1 m, es necesario introducir en el concreto un pulso sísmico de frecuencia mayor 40 KHz (es decir, una onda P con una velocidad cercana a los 4000 m/s y una longitud de onda menor a 0.1 m).

Por otro lado, como se ha mencionado en los apartados anteriores, la atenuación de las ondas de alta frecuencia aumenta en función de la profundidad, por esto en el estudio del concreto las ondas de baja frecuencia se utilizan para reducir el efecto de atenuación que se produce a causa de la reflexión y refracción entre el mortero y el agregado. Además, si la longitud de onda es menor al tamaño del agregado, se producirá el fenómeno de dispersión en cada interfaz del agregado y el mortero.

Por ejemplo, si el tamaño máximo del agregado es 25 mm en un concreto con una velocidad de propagación (V_P) de 4000 m/s, las frecuencias utilizadas para reducir el efecto de dispersión deben ser menores que $160 \text{ kHz} = 4000/0.025$. De esta forma el concreto se entenderá y se mostrará como un medio aparentemente homogéneo. Sin embargo, usando bajas frecuencias se reduce la sensibilidad en la detección de irregularidades pequeñas. Por lo tanto el método sísmico se encuentra limitado por el tamaño de dichas irregularidades.

1.5 Pruebas de integridad mediante métodos sísmicos

Los ensayos de integridad no destructivos suministran información sobre las dimensiones físicas, la continuidad o la consistencia de los materiales empleados en las cimentaciones, pero no da información sobre su comportamiento en condiciones de carga (Fernandez & Téllez, 2000).

Los métodos no destructivos ofrecen las técnicas más novedosas y fiables para la evaluación de la integridad en pilas, de los cuales los ensayos basados en los principios de propagación de ondas elásticas lo hacen a un costo y tiempo razonable. Además brindan la posibilidad de trabajar en diferentes tipos de ambientes sin generar ruido, destrucción o impacto ambiental, incluida la propia cimentación. Las técnicas dependen de la experiencia del operador y están limitadas a las características propias del concreto.

Entre los aspectos que ralentizan el desarrollo de técnicas y equipos de ultrasonido para la evaluación de estructuras de concreto se encuentra la obtención e interpretación de la señal a través de materiales heterogéneos, ya que las altas frecuencias del pulso ultrasónico (1 MHz o mayores) no tienen una penetración significativa en el concreto. Una alternativa es generar ondas elásticas de baja frecuencia usando impactos mecánicos. Con base en este sistema se han desarrollado diferentes ensayos para la inspección de estructuras de concreto. De forma general se pueden establecer tres grupos:

- Ultrasonido (*Ultrasonic pulse*): método usado para evaluar la calidad del concreto, fracturas y otras patologías, a partir de la introducción en el concreto de un pulso ultrasónico.

- Métodos sísmicos (*Echo method*): método basado en la medición de espesores para detectar discontinuidades e integridad en pilas a partir de la introducción en el concreto de una onda elástica mediante un golpe de martillo.
- Análisis espectral de ondas superficiales (SASW): método que se usa para determinar los espesores y módulos elásticos de capas de pavimentos.

Las pruebas de integridad basadas en métodos sísmicos deben realizarse con sumo cuidado, debido a que hasta la mínima vibración externa puede afectar los registros y dar resultados incorrectos. Cuando estas señales interfieren en el registro deben ser eliminadas mediante filtros digitales.

Para hacer de esta tesis un documento auto-contenido, a continuación se describen los aspectos básicos de las pruebas que se estudiarán en esta investigación. Para el lector interesado en descripciones más profundas sobre el tema se recomienda consultar Malhotra & Carino, 2004 y Santos, 2008.

1.5.1 Ultrasonido (*Ultrasonic Pulse*)

El método de ultrasonido consiste en obtener una velocidad promedio a partir de la medición del tiempo de viaje de una onda compresiva de ultrasonido que se propaga por el concreto. Las frecuencias de las ondas utilizadas son de 20 a 150 KHz (Kumar & Monteiro, 2006). El tiempo de viaje entre la emisión y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La velocidad de propagación (V_P) de la onda se define como el cociente entre la distancia de los transductores (L) y el tiempo de propagación (t).

$$V_P = \frac{L}{\Delta t} \quad (\text{Ecuación 1.5.1})$$

Los transductores pueden ser colocados en caras opuestas de la estructura de concreto generando una transmisión directa, o ser colocados en la misma cara generando una transmisión indirecta, utilizando uno o varios receptores. La velocidad V_P , típica para un concreto habitual se encuentra entre 3700 – 4200 m/s (Naik, Malhotra, & Popovics, 2004). El transmisor emite un pulso en el concreto con base en el principio de Huygen's (sección 1.1). Si el material es uniforme sólo se tendrá un trayecto de tiempo vs distancia. El pulso emitido al propagarse por el concreto sufre efectos de dispersión por lo que el pulso recibido es un complejo frente de onda que contiene múltiples reflexiones (Kumar & Monteiro, 2006).

Un factor crítico para una correcta medición es un buen acoplamiento entre la superficie del concreto y los transductores. Un mal acoplamiento produce que la onda se transmita por el aire, dando resultados erróneos, por lo que la superficie del concreto debe ser nivelada. Para evitar esto en superficies rugosas se puede utilizar una sonda de receptor exponencial con un diámetro de 6 mm localizada en la superficie del mortero libre de intemperismo (Naik, Malhotra, & Popovics, 2004). Cabe señalar que este tipo de sondas sólo es aplicable cuando se tiene un sólo receptor.

Aunque el ensaye es relativamente sencillo, para dar una correcta interpretación de los resultados, es importante conocer los factores que afectan a la velocidad de onda (V_P). Estos factores provenientes de las propiedades del concreto y otras fuentes externas son (Popovics, Rose, & Popovics, 1990):

- Tamaño, clasificación, tipo y contenido del agregado: muchas investigaciones han encontrado que el tipo de agregado afecta a la velocidad V_P . En general la velocidad de propagación V_P para un cemento es menor que la de un agregado. Además se ha comprobado que para una misma mezcla de concreto con igual nivel de resistencia a la compresión, su velocidad varía en función del tipo de agregado, presentando mayor velocidad de propagación, a mayor contenido de agregado. En la figura 1.5 se muestra la relación entre la velocidad de onda V_P y la resistencia a la compresión en función de la variación del agregado; se observa que independientemente del tipo y cantidad de agregado, si éste no presenta irregularidades las velocidades son en general altas, por arriba de los 4200 m/s.
- Relación agua – cemento: Se ha demostrado que cuando la relación agua – cemento (w/c) se incrementa, la velocidad V_P disminuye.
- Temperatura: Si la temperatura oscila entre 2 y 30° el efecto producido en la velocidad V_P es insignificante.
- Presencia de acero de refuerzo: La presencia de acero afecta fuertemente a la velocidad. La velocidad V_P en el acero es 1.4 – 1.7 veces mayor que el concreto. La velocidad que se adquiere en las vecindades del acero es mayor que en el resto del concreto. Existen factores de corrección recomendados por RILEM (RILEM NDT1, 1972) y los Estándares Británicos (BSI 1881, 1968). Sin embargo si se tiene un refuerzo de acero robusto no es posible obtener una medición correcta de la velocidad V_P .

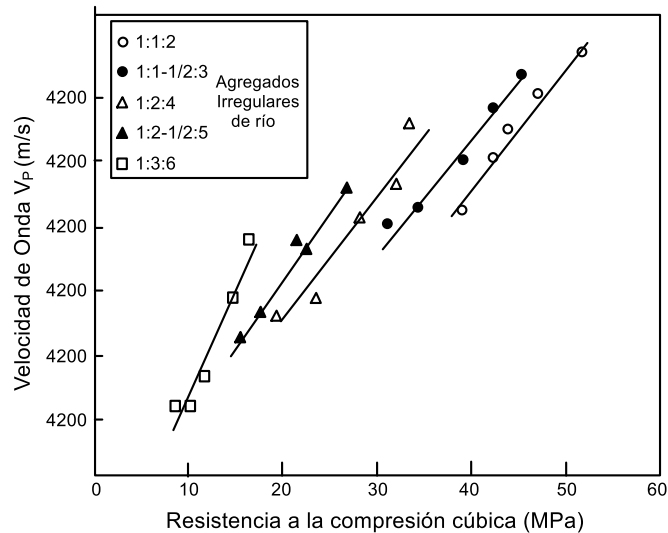


Figura 1.5 Relación entre la velocidad V_p y la resistencia a la compresión en función de la variación del agregado (modificado de Jones, 1962).

El método de ultrasonido ha dado resultados satisfactorios tanto en laboratorio como en campo para valorar la calidad del concreto, detectando heterogeneidades (grietas, deterioro, oquedades y variaciones en la mezcla) y monitoreando los cambios en sus condiciones a través del tiempo (realizando las mediciones en la misma posición en ciertos intervalos de tiempo).

Las heterogeneidades causan variaciones en la velocidad V_p . Por ejemplo, las oquedades producen difracción, generando una reducción en la velocidad. Para obtener la calidad de concreto por esta técnica se deben realizar varios puntos de medición, dispuestos en retícula. La separación entre puntos puede ser de 30 cm o mayor dependiendo de la cantidad de concreto, el tamaño y espesor de la estructura, variaciones esperadas y precisión requerida.

Aunque no exista una relación física entre la resistencia del concreto y la velocidad de propagación V_p , a partir de correlaciones gráficas se puede estimar este importante parámetro en función de V_p , un ejemplo de la relación entre estos dos parámetros se muestra en la figura 1.6. Esta relación no es única y se ve afectada por los factores antes explicados. Es necesario aclarar que no se debe intentar hacer estimaciones de la resistencia a la compresión a partir de la velocidad V_p , a menos que la correlación haya sido previamente establecida para el tipo de concreto a investigar (Phoon, Wae, & Loi, 1999).

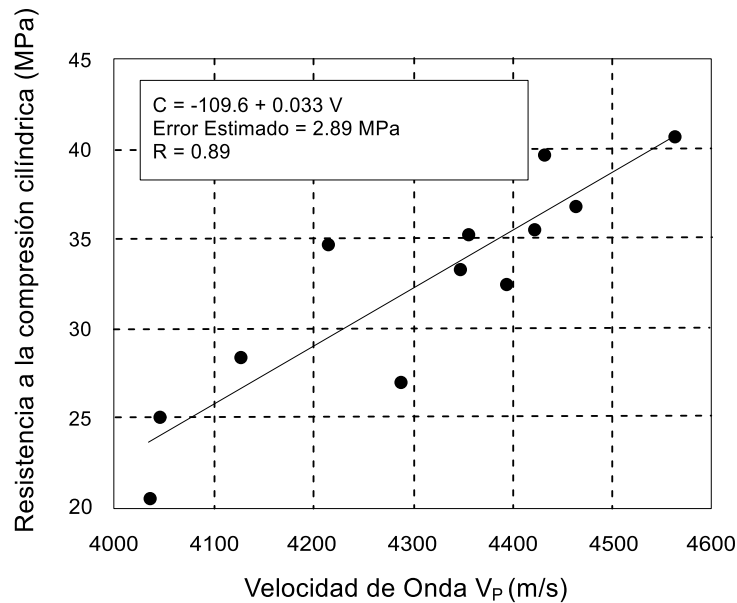


Figura 1.6 Ejemplo de la correlación entre la resistencia y la velocidad V_p de un concreto de buena calidad (modificado de Naik, Malhotra, & Popovics, 2004).

El significado y uso reglamentado de este método, está dado por la ASTM C597 – 09 (ASTM C 597-09, 2003), de forma general presenta las siguientes consideraciones importantes:

- El grado de saturación del concreto afecta la velocidad V_p , la técnica es menos sensible a las variaciones por heterogeneidades en un concreto saturado. Siendo la velocidad un 5% más alta en concreto seco. Por lo tanto la saturación es un factor que debe ser considerado en la interpretación de resultados.
- La velocidad V_p es independiente de las dimensiones de la estructura ensayada. Las dimensiones de la estructura deben ser mayores a la longitud de onda de las vibraciones por ultrasonido, para ser evaluadas.
- Un acoplamiento adecuado entre los transmisores y la superficie del concreto se puede observar en la forma y magnitud de la onda recibida, presentando un amortiguamiento sinusoidal.
- Sólo cuando las circunstancias lo permitan y exista una correlación establecida se puede estimar la relación resistencia – velocidad V_p .
- Se debe evitar posiciones de medición cercanas al acero reforzado, o donde el acero sea paralelo a la dirección de propagación de la onda.

1.5.2 Pulso sísmico (*Pulse-echo*)

El método tradicional de pulso sísmico consiste en introducir mediante un transmisor un pulso elástico. El pulso es propagado dentro del objeto ensayado y las reflexiones producidas por defectos o irregularidades son captadas por un receptor cercano a la fuente (sistema Pitch-catch) (ASTM E 114, 2002).

La señal de salida se observa en un *display* en el dominio del tiempo, mediante el uso del tiempo mostrado en pantalla, el tiempo doble de propagación, es decir ida y vuelta de la onda puede ser definido. Además, si la velocidad de propagación en el material es conocido, el tiempo de viaje puede ser usado para determinar la profundidad del reflector mediante la ecuación simplificada (vea Anexo D):

$$H = \frac{\Delta t V_P}{2} \quad (\text{Ecuación 1.5.2})$$

Donde, Δt es tiempo doble de propagación, H es la profundidad y V_P es velocidad de la onda P.

El factor de un medio corresponde al tiempo doble de propagación usado para determinar a profundidad. Esta ecuación es aproximada y es aplicable cuando la separación entre el emisor y receptor es reducida (Carino, 2004).

La mayoría de los transductores modernos usan cerámicas piezoeléctricas de Titanato Zirconato de Plomo (PZT) y Metaniobato de Plomo para generar y recibir ondas de compresión. El material piezoeléctrico al ser sometido a una deformación mecánica genera una diferencia de potencial eléctrico (voltaje) el cual es proporcional a la deformación aplicada, e inversamente se deforma en presencia de un campo eléctrico, lo que caracteriza a los efectos piezoeléctricos inverso y directo respectivamente.

Los piezoeléctricos proporcionan un medio de conversión de las oscilaciones eléctricas en oscilaciones mecánicas y viceversa. Por lo tanto, cuando el transmisor es excitado por un pulso de alto voltaje, la vibración generada en función del tiempo es una curva sinusoidal amortiguada con una frecuencia característica (Alves, 2010).

La mayor parte de la energía transmitida dentro de un objeto ensayado, irradia en forma de cono con vértice en el transmisor.

La relación entre el diámetro del transmisor (d) y la longitud de la onda (λ), está determinada por los patrones de radiación del pulso elástico (Carino, Stress Wave Propagation Method, 2004). En la figura 1.7 se observan la direccionalidad característica de la propagación de la energía en el concreto cuando: $d/\lambda = 4$, $d/\lambda = 1$, y $d \ll \lambda$ (para una fuente puntual). Estas figuras representan la variación de la amplitud del cono en función de la longitud de onda y el diámetro.

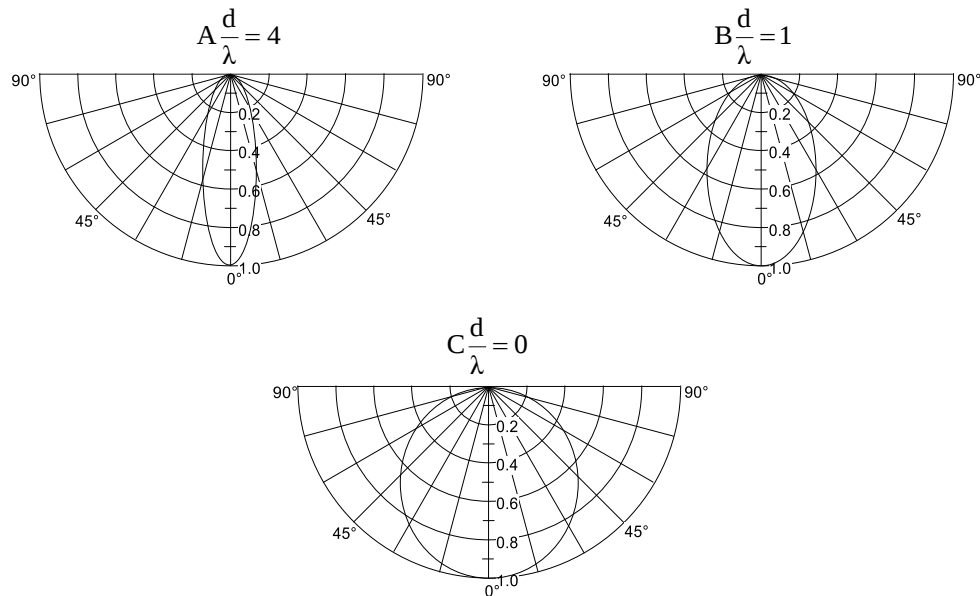


Figura 1.7 Patrones de radiación en función del diámetro del transmisor (d) y la longitud de onda (λ). Relación de Poisson = 0.2 (modificado de Carino, 2004).

De forma general se observa que cuando d/λ decrece, la amplitud del cono aumenta, es decir, la direccionalidad de la energía disminuye. Dando como consecuencia, que la propagación del pulso abarque mayor volumen, dificultando la identificación de los límites y los defectos internos de la estructura ensayada. Carino (2004) define que para la evaluación del concreto se necesitan transductores de 100 kHz de un diámetro de 0.16 m, que generen ondas P con una velocidad de 4000 m/s.

Por lo tanto para ensayos de pulso sísmico en concreto se necesitan transductores de baja frecuencia de corta duración (tiempo de duración en microsegundos), sin embargo su fabricación es difícil y si además le agregamos que su tamaño es relativamente grande (a menor frecuencia, mayor tamaño) se dificulta el acoplamiento con la superficie del concreto.

Utilizar este método se vuelve muy complejo. Razón por la que no existen transductores comerciales para el ensaye de concreto en campo. Sin embargo este método se ha utilizado eficientemente en laboratorio y ayudado a entender el comportamiento de los transductores y de la propagación de las ondas en el concreto.

Forrest (1977) investigador del Laboratorio Naval de Ingeniería Civil, reportó el uso del pulso sísmico para medir la longitud de una pila de concreto de 24 m, utilizando un transductor de larga duración (tiempo de duración en milisegundos), con una frecuencia de 12 kHz. El sistema funcionó de manera eficiente porque se tuvo el tiempo suficiente para que el pulso transmitido se amortiguara antes del arribo de la reflexión producida por la base de la pila.

1.5.3 Impacto sísmico (*Impact-echo*)

La idea de generar una onda o pulso elástico a partir de un impacto es una idea que ha sido desarrollada para eliminar el uso de transmisores de gran tamaño. El pulso generado por un impacto está compuesto por ondas de baja frecuencia que tienen la capacidad de penetrar en el concreto, y tiene ventajas sobre otros métodos no destructivos. Se ha demostrado que puede localizar defectos en el área de interés, tiene la capacidad de penetrar ductos metálicos y viajar a través del acero de refuerzo (Abramo, 2011).

Sin embargo la onda transmitida no tiene unidireccionalidad, por lo que la energía se propaga en todas direcciones y las reflexiones recibidas provienen de cualquier dirección. Las reflexiones de la onda producida por el impacto son medidas y recibidas por un receptor, almacenándolas en un sistema de adquisición de datos. Debido a que el receptor es colocado cerca del punto de impacto, los arribos registrados serán dominados por las deformaciones causadas por la onda P (Sansalone & Carino, 1986). El éxito del método depende en gran parte del uso de un impacto de corta duración.

Si una onda golpea un reflector orientado favorablemente dentro del objeto de prueba, la onda se refleja regresando a la superficie donde la deformación es captada por el receptor y almacenada. La onda generada puede ser simple o compleja dependiendo del objeto a ensayar.

Este método ha dado resultados satisfactorios en largas y esbeltas estructuras, principalmente en la inspección de pilas. La frontera de la pila actúa como guía de la onda y la energía propagada se centra naturalmente por el límite lateral de la pila. Además existe el tiempo suficiente entre la generación del pulso y la recepción de la onda reflejada desde la base inferior, de una discontinuidad u otro defecto para que el tiempo de llegada de la onda reflejada sea fácilmente determinado, incluso si el impacto producido por el martillo es de larga duración (Olson & Church, 1986).

La unidad de control en un sistema de impacto sísmico tiene la capacidad de mostrar los resultados en tiempo real y con una interpretación rápida llegar a conclusiones sobre la existencia de anomalías. Es importante considerar que en los registros las reflexiones observadas no sólo provienen de defectos sino que también son originadas por cualquier cambio en las propiedades elásticas del concreto de la pila.

Los registros obtenidos se pueden analizar en el dominio del tiempo (mediante la ecuación 1.5.2) o en el dominio de la frecuencia (mediante la ecuación 1.5.3) para obtener la profundidad (H) a la que se encuentra el cambio de interfaz en el concreto (Carino, Sansalone, & Hsu, 1986).

$$H = \frac{V_p}{2f} \quad (\text{Ecuación 1.5.3})$$

Donde, f es la frecuencia contenida en el impacto e impartida a la estructura

Un ejemplo del registro obtenido (tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia) en una pila ensayada se muestra en la figura 1.8. El tiempo cero corresponde al impacto del martillo, la onda directa producida por el impacto causa el primer conjunto de picos, la reflexión producida por la base inferior de la pila origina el segundo conjunto de picos de amplitud menor.

La correcta selección de la fuente de impacto es un aspecto fundamental en el método de impacto sísmico. La curva fuerza–tiempo del impacto es aproximadamente la mitad de un ciclo de una curva sinusoidal (figura 1.8). La duración del impacto dado por el “tiempo de contacto” se define como el tiempo de contacto entre la fuente de impacto y la superficie de impacto (vea Anexo E).

El tiempo de contacto determina la frecuencia de la onda generada por el impacto y esta a su vez define el tamaño de las irregularidades (oquedades y fracturas) que pueden ser detectadas por un ensayo de impacto sísmico (Carino, Sansalone, & Hsu, 1986). Entre más corto sea el tiempo de contacto, mayor contenido de altas frecuencias (longitud de onda corta) lo que conlleva a detectar irregularidades más pequeñas.

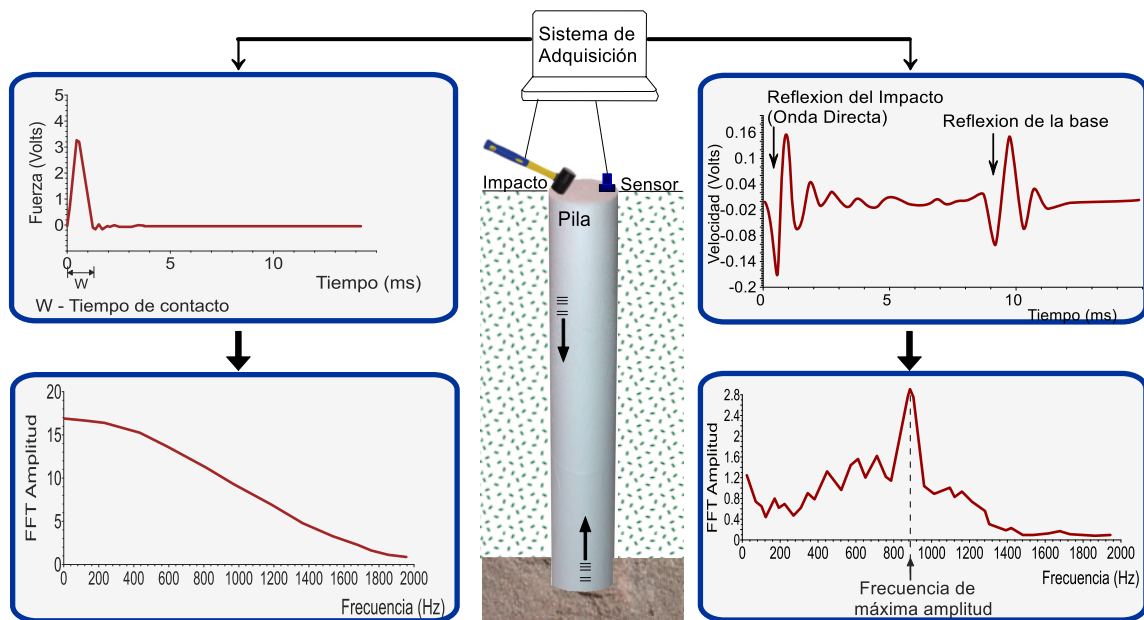


Figura 1.8 Principio del método de Impacto sísmico en una pila.

Adicionalmente, es necesario un impacto de corta duración para observar defectos superficiales (reflexiones cercanas a la cabeza de la pila (Malhotra & Carino, 2004). Como una aproximación, la componente de frecuencia de mayor amplitud (en su espectro de amplitud) es igual a la inversa del tiempo de contacto.

Por ejemplo para un tiempo de contacto de $100 \mu\text{s}$, la frecuencia de mayor amplitud es de 10 kHz . Por lo tanto, para una velocidad de onda V_P de 4000 m/s es necesario un impacto con un tiempo de contacto menor a los $100 \mu\text{s}$ para detectar irregularidades del orden de 0.2 m . Sin embargo, la experiencia ha demostrado que si el tiempo de contacto es muy pequeño el espectro de amplitudes se torna muy complejo debido al fenómeno de dispersión generado por el agregado. Por lo que se recomienda usar un tiempo de contacto de mayor duración (Sansalone & Streett, 1997).

Muchas fuentes de impacto han sido probadas, los martillos producen energía con un tiempo de contacto mayor a 1 ms, sin embargo esto es aceptable para la evaluación de largas y esbeltas estructuras como las pilas (Brenderberg, 1980).

El impacto de un martillo genera un pulso de baja frecuencia lo que asegura que la longitud de la onda sea mayor que el tamaño de los agregados del concreto. Desafortunadamente, esto reduce la sensibilidad para detectar defectos pequeños. Por lo tanto, para un tiempo de contacto típico de 0.9 ms, la frecuencia impartida a la estructura más significativa será menor a 1200 Hz. Asumiendo la velocidad de onda V_p de 4000 m/s con un rango de frecuencias de 0 a 2000 Hz (típico de los martillos usado para las pruebas de bajo impacto), la longitud de onda más corta introducida en la estructura será del orden de 1 m.

Como receptores se utilizan acelerómetros o geófonos. El sistema de adquisición debe de tener una frecuencia de muestreo de al menos 500 kHz para la correcta reconstrucción y digitalización de la onda (Pratt & Sansalone, 1992).

Cuando el método de impacto sísmico es aplicado a pilas y pilotes generalmente se le denomina “Prueba de Integridad de Baja Deformación”. A partir de este sistema se han desarrollado diferentes análisis, de forma general se pueden establecer cinco grupos (Chernauskas, 2005):

- a) Pulso simple (*Sonic Echo* - SE): También llamado método de Sísmica de Reflexión. El cabezal de la pila se instrumenta exclusivamente con un acelerómetro o geófonos, se genera una onda de compresión mediante un martillo manual.
El análisis se realiza en el dominio del tiempo, y las frecuencias contenidas en la traza sísmica se obtienen mediante una transformada rápida de Fourier FFT. Se usa para inferir la longitud de la pila, la ubicación de anomalías y en cierta medida el tamaño de dichas anomalías.
- b) Pulso combinado (*Impulse Response* - IR): También llamado de Respuesta Dinámica Transitoria. Es semejante al anterior pero el martillo se instrumenta con celda de carga o acelerómetro mediante el cual se mide la magnitud de la fuerza aplicada y su disipación en el tiempo para obtener la señal de fuerza-tiempo durante el impacto.

Para calcular la respuesta dinámica del elemento, la función fuerza-tiempo de entrada se convoluciona con la función de respuesta al impulso (figura 1.8), el análisis se realiza tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia mediante el espectro de movilidad (*mobility plot*). Se aplica para deducir la longitud del eje, la ubicación y el tamaño de las anomalías, y la rigidez del sistema suelo-pila.

- c) Pulso combinado y análisis de impedancia (*Impedance Log – IL*): Es similar al pulso combinado, pero se complementa con el análisis espectral de los datos IR mediante un modelado analítico, basado en los cambios de impedancia que pudieran suceder a lo largo de la pila. Esto conduce a una imagen muy cercana a la geometría real de la pila tal como existe en el suelo.
- d) Micro *down hole*. Es el método geofísico down hole aplicado a una pila. En efecto, durante la construcción de la pila, se deja un tubo de PVC en su parte central. Posteriormente, se llena de agua y se coloca el hidrófono a diferentes profundidades. Para cada profundidad, se genera un pulso en superficie, registrando su arribo a las distintas profundidades donde es colocado el hidrófono.
- e) Micro *cross hole*. Al igual que el método previo, esta técnica es la aplicación del método geofísico a una pila.

Como se observa en el listado anterior, la determinación indirecta de la calidad y profundidad de la pila se realiza mediante el análisis de la velocidad, aceleración de las ondas de compresión P y la impedancia. Para el caso del *down hole* y *cross hole* estos son considerados métodos semi-indirectos, ya que existe una alteración en la estructura de la pila.

La prueba de impacto sísmico de baja deformación PIT (*Pile Integrity Test*) perteneciente al grupo IL (*Impedance Log*), es la más utilizada internacionalmente para determinar la integridad de pilotes, a través del análisis de la respuesta de la velocidad, impedancia y fuerza inducida por un impacto de martillo (con un peso de 900 gramos y una duración de pulso menor a 1 ms) aplicado axialmente al pilote, normalmente en el cabezal. Como receptor se utiliza un acelerómetro, cuya señal se integra para su procesamiento. El registro de velocidad contiene información acerca de la geometría y longitud de la estructura, así como la ubicación y magnitud de las irregularidades.

Diversas instituciones en California (Baker, Drumright, J. L., Mensah, & Parikh, 1993), Londres (Turner, 1997), Universidades como la Universidad de Texas A&M (Briaud, Ballouz, & Nasr, 2002) y la Universidad de Houston (Samman & O'Neil, 1997), han realizado pruebas en sitio para determinar el éxito del método bajo ciertas circunstancias, de ellos se concluye las condiciones que pueden o no ser detectadas.

- Condiciones detectables: base de la pila, inclusiones de tamaño considerable, fracturas, juntas, incremento y decremento en la sección transversal, cambios litológicos en las capas circundantes a la pila, cambios bruscos del material dentro de la pila.
- Condiciones no detectables: incremento o decremento gradual a lo largo de toda la pila, formas curvas, inclusiones pequeñas, cambios graduales del material dentro de la pila, suelos blandos en el contacto con la base de la pila, fragmentos o material suelto en la base, desplazamientos del equipo y paquetes de lodos o limos.

En la figura 1.9 se muestra una pila de 3 m de largo, con un cambio brusco de material a los 1.2 m, correspondiente a 10 cm de concreto de mala calidad (velocidades de onda V_P muy bajas) y considerando algunos de los análisis del método de impacto sísmico.

La determinación de la ubicación y el tamaño de los defectos están limitados por el contenido de frecuencias de las ondas de propagación. Ondas de baja frecuencia son necesarias para identificar la base de la pila. Y se necesitan frecuencias más altas para detectar defectos pequeños en el concreto. Sin embargo, las longitudes de onda tienen que ser más grande que el diámetro del eje para asegurar que la propagación de la onda sea esencialmente unidimensional y que el eje se comportará como una estructura en forma de varilla, en lugar de un medio elástico infinito (Hearne, Stokoe, & Reese, 1981).

Una restricción importante es la relación longitud - diámetro (L / D) que depende de los suelos circundantes, los suelos rígidos contribuyen a la atenuación de las ondas de compresión P . El valor típico en una arcilla compacta es de aproximadamente 30:1. Generalmente, en la práctica se acepta que si la relación $L/D > 30$ (L – longitud, D – diámetro), la base de la pila no puede ser determinada (Finno, Gassman, & Osborn, 1997).

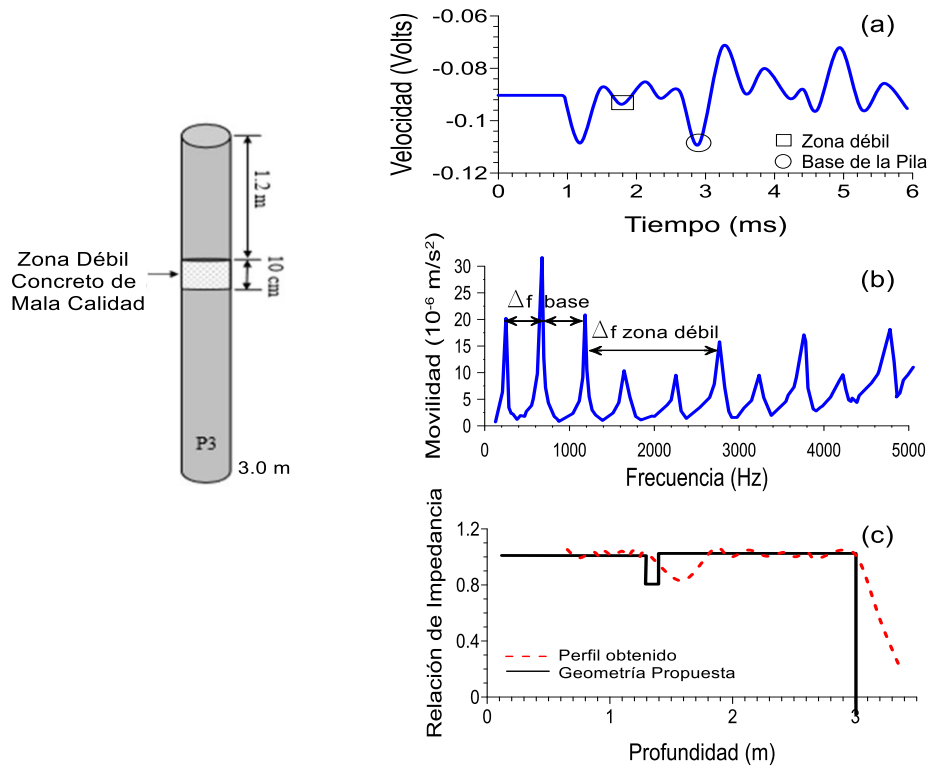


Figura 1.9 Analisis de la respuesta obtenida con el método de impacto sísmico: a) Pulso simple, b) Pulso combinado y c) Análisis de impedancia (modificado de Lai *et al.*, 2008).

La estandarización del método para determinar irregularidades usando el método de impacto sísmico es difícil, por el amplio rango de variables que intervienen en el ensaye. Sin embargo, en 1998 la ASTM estandariza el método de impacto sísmico para determinar el espesor de losas de concreto a partir del análisis de la velocidad de onda V_P en el dominio del tiempo y la frecuencia mediante la designación ASTM C1383 (2002).

En lo referente a las pruebas de integridad de baja deformación, las pruebas de pulso simple y pulso combinado están normadas por la designación ASTM D5882, mientras que la de *cross hole* por la designación ASTM D6760.

CAPÍTULO 2. INSPECCIÓN DE PILAS MEDIANTE SÍSMICA DE REFLEXIÓN

Una metodología que correlacione algunas de las pruebas de integridad, puede reducir la incertidumbre del método y de resultados eficientes en el análisis de la velocidad de propagación de la onda de compresión. A partir de esta reflexión en este capítulo se presenta una metodología que toma en cuenta esta necesidad y anota a favor del estado del arte y de la práctica a este respecto.

2.1 Procedimiento general

El procedimiento de la prueba de integridad para la inspección de pilas es una conjunción de diferentes técnicas bien acreditadas, esto con la finalidad de llegar a resultados lo más precisos posible y que sean susceptibles de comparación y ponderación.

Las técnicas que se emplean son:

- a) Ultrasonido
- b) Impacto Sísmico (*Impact Echo*):
 - PET (*Pile Echo Tester*)
 - Reflexión Sísmica (*Sonic Echo*)

En la prueba se utiliza el método de Ultrasonido (*Ultrasonic Pulse*) para obtener de forma inmediata la velocidad del concreto en la parte más superficial. A partir de esta velocidad, se calibra el PET.

Tanto el PET como la prueba de reflexión sísmica, pertenecen al grupo de ensayos de pulso simple del método de impacto sísmico. La diferencia radica en el sensor que mide la respuesta de la pila.

Para el caso del PET se utiliza un acelerómetro mientras que para la reflexión sísmica se utiliza un geófono. En la tabla 2.1 se muestran algunos de los parámetros característicos del ensayo a partir del impacto de martillo y un acelerómetro.

El PET proporciona un registro o reflectograma que muestra cambios en la impedancia dentro de la pila, estos cambios dan fácilmente la longitud y cambios en la sección de la pila. (Pile Test, 2008). La profundidad de la base e irregularidades de la pila dependen de la velocidad de onda V_P que se asuma para el concreto. La velocidad que se toma es la obtenida mediante el método de Ultrasonido.

Tabla 2.1 Parámetros físicos que caracterizan una prueba de impacto sísmico (Fernández, 2010).

Masa martillo	0.5-5 kg
Deformación máxima en pilote	$2 \cdot 10 \times 10^{-6}$
Fuerza máxima	2-20 kN
Duración de la fuerza	0.5-2 ms
Aceleración del pilote	50 g
Desplazamiento del pilote	0.01 mm
Longitud onda relativa (*)	0.1

(*) Relación entre la longitud de onda de la fuerza aplicada y el doble de la longitud del pilote.

La prueba de reflexión sísmica genera registros que son procesados en gabinete, mediante la colocación de varios geófonos y la obtención de registros simultáneos se observa de forma más detallada la propagación de la onda a partir de diferentes trayectorias en la pila, éstas se analizan y es posible identificar las discontinuidades. A partir esta técnica se obtienen profundidades más acertadas que se cotejan con las pruebas de Ultrasonido y PET.

Esta metodología permite hacer una comparativa entre las tres técnicas, reducir la incertidumbre e identificar los resultados más factibles y confiables para las pilas ensayadas.

2.2 Ultrasonido

El equipo empleado en esta técnica es el dispositivo de baja frecuencia para la evaluación de concretos de la marca *Acoustic Control Systems*, modelo UK1401 mostrado en la figura 2.1. Es un equipo versátil de rápida adquisición de datos que nos permite obtener de forma inmediata la velocidad más somera del concreto en la parte superior de la pila.

Las especificaciones del equipo se encuentran en la tabla 2.2. Como se describe en el capítulo 1, la frecuencia se encuentra dentro del rango establecido y el tamaño del diámetro en los transductores resulta eficiente en concretos con superficies rugosas, permitiendo un mejor acoplamiento, evitando que el cabezal tenga que ser pulido y dando mayor simplicidad a los requerimientos para llevar a cabo la prueba, de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM C-597 (2003).



Figura 2.1 Dispositivo de baja frecuencia para la evaluación de concretos UK1401.

El equipo se coloca directamente sobre el cabezal de la pila o alguna parte expuesta del concreto limpio y libre de residuos. Se emite el pulso y el dispositivo nos proporciona de manera inmediata la velocidad de propagación de la onda P. Conocida la separación de los transductores y el tiempo de propagación, se calcula la velocidad de onda P a partir de la ecuación 1.5.1.

Se realizan 3 o 4 mediciones en diferentes partes del cabezal de la pila, obteniendo una velocidad promedio y representativa de la zona. Esta velocidad se compara con diferentes criterios existentes para determinar la calidad del concreto (Tabla 1.1 y 2.3), y es así como se conocerá el estado del concreto en la parte superior de la pila ensayada.

Este primer paso, aunque en principio simple, es la base de la técnica ya que se ha demostrado que la velocidad que se tiene a partir del método de ultrasonido es precisa, considerando que la propagación de la onda sólo representa la parte más superficial de la pila.

Sin embargo, esta velocidad nos sirve de apoyo para realizar los cálculos posteriores en el método de impacto sísmico y PET, donde se desconocen totalmente las profundidades y las velocidades del material se asumen, reduciendo así la incertidumbre del método. El cálculo de la velocidad de onda V_P en el concreto para la evaluación de integridad de pila, a partir del método de ultrasonido ha dado resultados satisfactorios en trabajos anteriores (vea Finno, 1997).

Tabla 2.2 Especificaciones del dispositivo de baja frecuencia UK1401 (ACSYS, 2006).

Separación de transductores	150 mm
Rango de tiempo	15 a 100 μ s
Rango velocidades medidas	1500 - 9999 m/s
Error de medición	$\pm 1\%$
Frecuencias de operación	50 kHz
Frecuencia de la emisión de pulso	5 – 25 kHz
Diámetro de los transductores	10 mm
Longitud de los transductores	45 mm

Las velocidades de onda determinadas por este método son aproximadamente 5 a 15% más altas que las determinadas por las pruebas de integridad de baja deformación (ver Anexo B). Esto debido a la naturaleza de la prueba, ya que la frecuencia del pulso de emisión es de 5 – 25 kHz, generando una fuente con una longitud de onda mucho menor que el diámetro. Por lo tanto, se puede suponer que la onda viaja en un medio infinito en lugar de una estructura larga y delgada.

Tabla 2.3 Evaluación la calidad mediante la velocidad de pulso (ONCCE NMX-C-275, 2004).

Velocidad de onda P (m/s)	Calidad del concreto
Mayor a 3000	Buena
2500 – 3000	Regular
Menor a 2130	Pobre

2.3 PET (*Pile echo tester*)

El PET se basa en los principios del método de impacto sísmico (*impact echo*). La pila se golpea en la parte superior o cabezal con un martillo de plástico ligero, generando una onda de compresión de aceleración apreciable y baja deformación, que se propaga a lo largo del fuste de la pila hasta encontrar un reflector o discontinuidad que consisten en un cambio de impedancia mecánica.

Los movimientos consiguientes de la cabeza de la pila son captados y la onda reflejada es registrada y analizada por el acelerómetro. El registro o reflectograma resultante, contiene información sobre dichos cambios de impedancia, que pueden deberse a un cambio de material (tal como ocurre en la base de la pila), un cambio en el área de sección o una fractura (Davis & Dunn, 1974).

2.3.1 Instrumentación

El equipo utilizado para el ensayo fue el *Pile echo tester* (PET) de la marca *Pile Test* modelo Pro USB, basado en los principios del método de impacto sísmico y análisis de impedancia. Como se muestra en la figura 2.2, los componentes del PET son: software de adquisición, almacenamiento y procesamiento (compatible con cualquier computadora portátil), un martillo de mano y un acelerómetro.

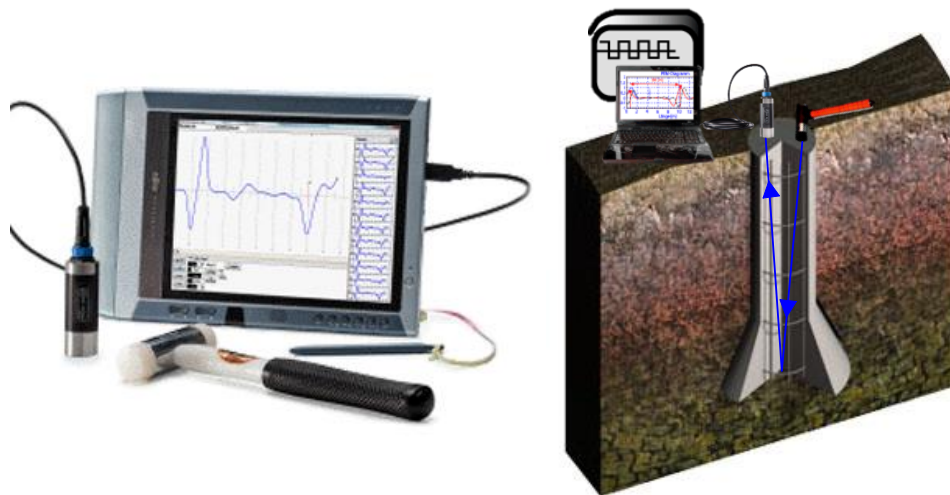


Figura 2.2 Equipo *Pile echo tester* (PET) modelo Pro USB (modificado de Pile Test, 2008)

El martillo de mano utilizado tiene un peso de 900 g, cuenta con una punta de plástico que produce un pulso de fuerza menor a 1 ms de duración, sin causar daño alguno a la pila, e induce una gama de frecuencias de hasta 2000 Hz (Higgs & Robertson, 1979). Las puntas de martillo más suaves inducen gamas de frecuencias de 0 a 600, 650, o 800 Hz, dependiendo de la rigidez de la punta (Davis & Chairman, 1998). El procedimiento del PET cumple las especificaciones establecidas por la norma americana ASTM D5882 (ASTM D 5882, 2002), los requerimientos se describen en la tabla 2.4.

2.3.2 Adquisición

Para pilotes prefabricados o pilas coladas en sitio, la prueba de impacto sísmico deberá efectuarse después de 3 a 4 semanas del colado o inmediatamente de que el concreto alcance el 75% de la resistencia de diseño para garantizar un grado de endurecimiento y un módulo de elasticidad que permitan que la onda se propague (ASTM D 5882, 2002).

Las pilas no requieren ninguna preparación especial, únicamente se necesita que se haya realizado ya el descabezado en el momento del ensayo, para que el golpe del martillo se realice sobre el concreto sano y la onda no refleje en discontinuidades prevenientes del concreto existentes en la cabeza de la pila antes del descabezado. Al igual que en la técnica de ultrasonido la superficie de ensayo debe encontrarse limpia, seca y libre de residuos (lechada y/o bentonita).

Para la adquisición de datos el acelerómetro debe ser fijado a la superficie mediante una pasta suave (*petro wax*, vaselina, etc.) para asegurar que el eje sensible del acelerómetro se encuentre alineado a la superficie de pila (Frank, Ren Kung, & Likins, 1991). El acelerómetro se coloca generalmente en el centro de la cabeza de la pila y el golpe del martillo se debe aplicar a una distancia de 30 cm del acelerómetro (ASTM D 5882, 2002).

Se ejecutan varias mediciones para un mismo punto, estas se promedian para reducir los efectos de señales aleatorias o ruido externo (se considera ruido externo a toda vibración ajena al impacto generado por el martillo). Cuantos más golpes de martillo se registren, mayor es la reducción en los efectos de señales provenientes de otras actividades o del ruido del sistema (Finno, Gassman, & Osborn, 1997).

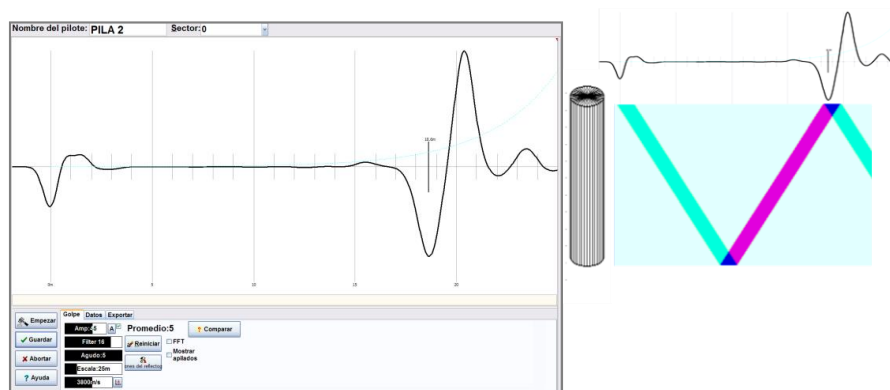
Tabla 2.4 Desglose de requerimientos por la ASTM D5882 (Pile Test, 2008).

Artículo	Descripción	Requerimientos	Conformidad
5.1.1.	Aplicación de la fuerza de impacto	Martillo con punta de plástico duro	Previsto
5.2.1.	Linealidad del Acelerómetro	Hasta 50 g	Cumple
5.2.1.	Constante de tiempo del acelerómetro	≥ 0.5 s	Cumple
5.2.1.	Frecuencia de resonancia	≥ 30 kHz	Cumple
5.2.1	Exactitud de calibración	5%	Excede (1% de precisión)
5.3.	Transmisión de señal	Cable blindado para evitar el ruido de baja frecuencia	Excede (transmisión digital + corrección de errores)
5.4.1.	Aparato	Pantalla gráfica permanente	Ofrecido (pantalla de la computadora)
5.4.1.	Aparato	Capacidad de almacenamiento de datos	Ofrecido (ordenador disco duro)
5.4.1.	Aparato	Capacidad promedio de golpes	Ofrecido por software
5.4.1.	Aparato	Amplificación variable	Ofrecido por software
5.4.1.	Aparato	Capacidad de filtrado	Ofrecido por software
5.4.2.	Aparato de grabación	12 bits resolución A / D	Excede (24 bits)
5.4.2.	Frecuencia de muestreo	≥ 30 kHz	Excede (50 kHz)
5.4.2.	Variación de tiempo	$\leq 0.01\%$	Excede

(Tabla numerado en el orden del documento D5882-07 ASTM)

2.3.3 Procesamiento e Interpretación

El software genera un gráfico de velocidad producto del promedio de varios impactos. Estos gráficos permiten identificar la reflexión producida por la base de la pila y reflexiones producto de posibles irregularidades en la composición del mismo. Si la pila se encuentra en buenas condiciones, el gráfico se observa como una línea relativamente recta con dos picos en los extremos (figura 2.3). El primero de ellos es el causado por el impacto del martillo, mientras que el segundo es causado por la reflexión en la base de la pila. La precisión de la determinación de la longitud depende de la velocidad de la onda asumida. Este factor, que depende del grado y edad del concreto, varía de una pila a otra y puede causar un error del orden de 10 por ciento.



31

Las respuestas del PET han sido ampliamente estudiadas y simuladas en función de la variación de la impedancia y el porcentaje de energía reflejada y transmitida (ver Anexo C). En la figura 2.4 se presentan las simulaciones realizadas con el software *Pile Wave* (PileTest, 2014), donde se observan las respuestas para diferentes condiciones presentes en una pila.

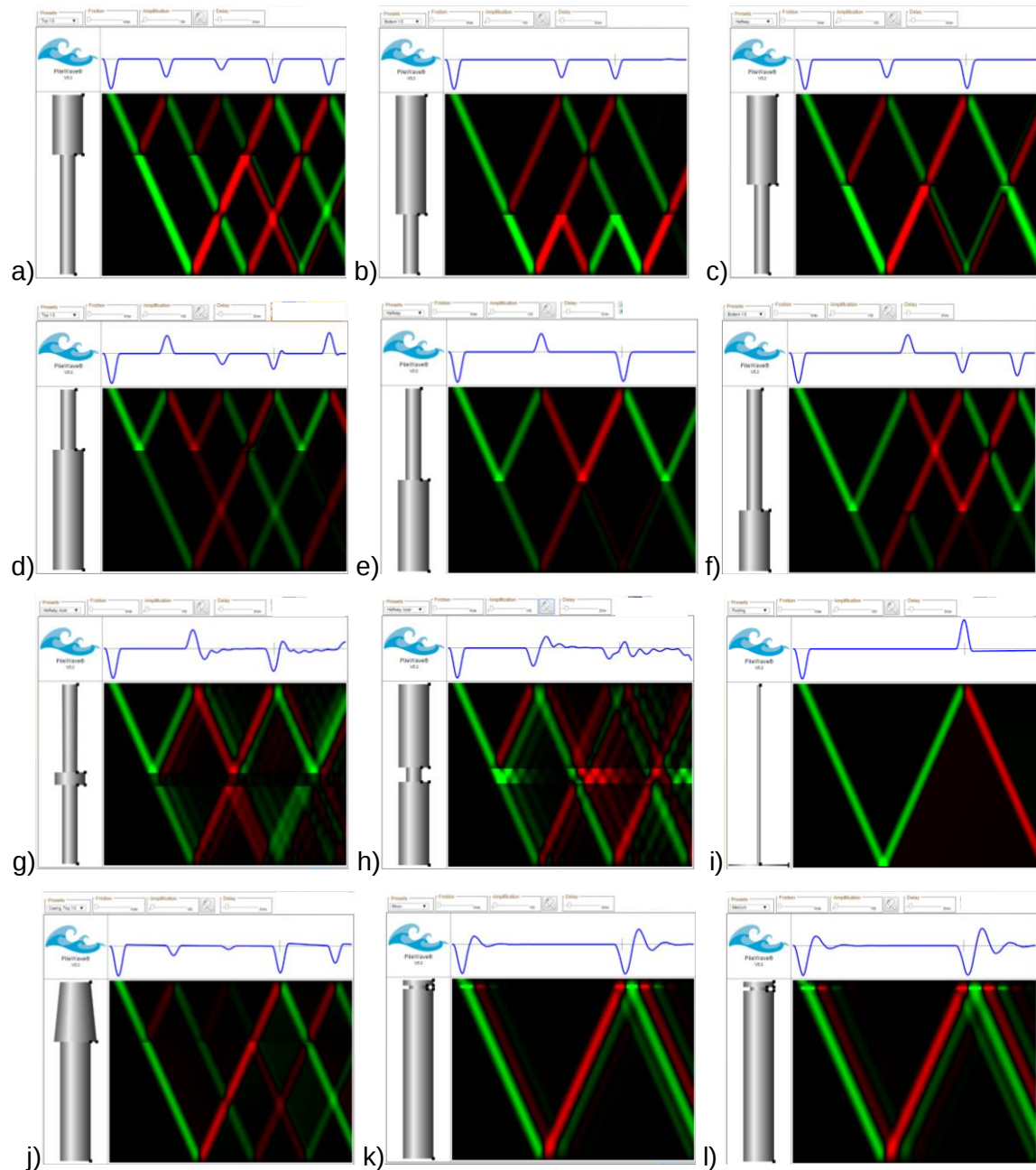


Figura 2.4 Simulación *Pile Wave* para diferentes condiciones presentadas en una pila.

Se observa que cuando se presenta un acortamiento en algún punto del pilote/pila (figura 2.4 a, b, c, j) la impedancia disminuye, por lo que un porcentaje pequeño de la energía incidente es reflejada hacia la superficie mientras que el mayor porcentaje continúa su viaje transmitiéndose al medio inferior. La disminución de la impedancia genera una reflexión con aumento de velocidad, observándose en el registro como una reflexión positiva (en el mismo sentido de la reflexión causada por el impacto del martillo).

Inversamente cuando se tiene ensanchamiento (figura 2.4 d, e, f, i) la impedancia aumenta, por lo que la mayor parte de la energía incidente es reflejada hacia la superficie mientras que el resto continúa su viaje transmitiéndose al medio inferior. El aumento de la impedancia genera una reflexión con disminución de velocidad, observándose en el registro como una reflexión negativa (en sentido contrario a la reflexión causada por el impacto del martillo).

Sin embargo, si la variación de la impedancia se ubica a menos de la mitad superior de la longitud de la pila/pilote (figura 2.4 a y d) se producen múltiples o reverberaciones que pueden ser confundidas como irregularidades. Por lo tanto la detección e interpretación de eventos posteriores se torna difícil y confusa.

El resto de los diagramas de la figura 2.4 muestra una combinación de los casos antes mencionados, teniendo un cambio (aumento-disminución) de la velocidad, observándose en el registro como una sucesión de reflexiones positivas y negativas en función de la variación de la impedancia.

Los efectos de la fricción del suelo alrededor del fuste de la pila se observan en la señal al incrementar o reducir la velocidad en las zonas donde no se presenta ninguna reflexión. Si el suelo adyacente al fuste absorbe la energía, se reduce el porcentaje de energía reflejada a la superficie. La figura 2.5 a), b) y c) muestra los efectos de un suelo con fricción mayor para los casos de a) d) y g) respectivamente de la figura 2.4, observándose como el aumento de la fricción produce reflexiones con amplitudes menores.

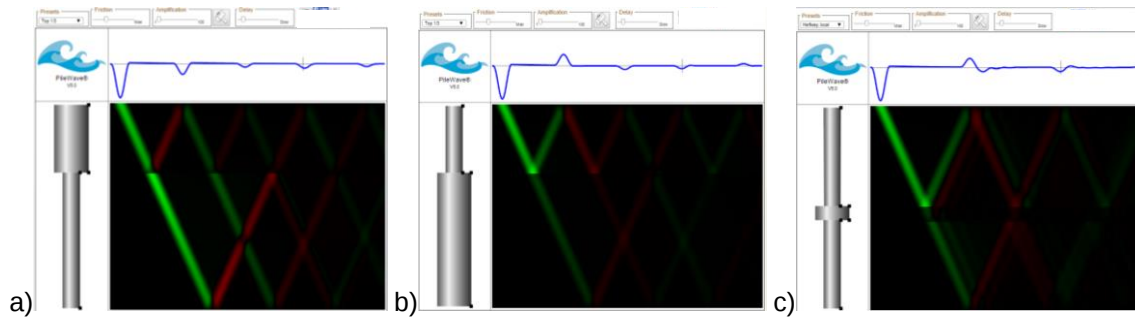


Figura 2.5 Simulación *Pile Wave* del efecto de una fricción mayor alrededor de una pila.

En suelos con alta fricción, así como en la roca, suele suceder que la reflexión producida por la base de la pila no es visible. Esto puede ocurrir cuando la longitud excede de 20 a 40 diámetros de la pila, dependiendo de la cantidad de fricción existente (Pile Test, 2008).

Se considera que el análisis de la pila con un cambio de dos secciones es suficiente para la interpretación práctica del ensayo de PET, ya que aun en el caso de que la pila tenga varios cambios de impedancia a lo largo de su longitud, es muy difícil, y para propósitos prácticos imposible, pretender identificar el efecto de diferentes cambios a partir de una prueba de este tipo (Rodríguez & Restrepo, 2006). El efecto de un sólo cambio significativo determina la respuesta en el ensayo, y es lo que es importante identificar e interpretar adecuadamente en la prueba.

Sobre una pila/pilote cuya longitud es conocida, el análisis permite determinar la velocidad media de las ondas en el concreto y detectar heterogeneidades del material. A la inversa, el análisis permite deducir la longitud de la pila/pilote o la profundidad del nivel de reflexión, si se conoce la velocidad de las ondas en el concreto. Es para este caso donde la velocidad promedio obtenida a través del ultrasonido nos puede servir como referencia en la determinación de la longitud de la pila/pilote.

La respuesta real de una pila va más allá de los casos antes mencionados, ya que durante el proceso constructivo el suelo se mezcla con el concreto, originando que la pila muestre geometrías complejas. Razón por la que este método no es suficiente para dar respuesta al objetivo de controlar la interacción pilote/suelo, ni tampoco para calificar con precisión las irregularidades geométricas de las cimentaciones.

Por consiguiente, este método se adapta mejor a la revisión de pilotes prefabricados, de geometría uniforme, en los que se trata de verificar las longitudes totales o las roturas (Rodríguez & Restrepo, 2006). Sin embargo, el dispositivo PET nos sirve de apoyo y nos permite tener de forma inmediata en campo una visión preliminar de las condiciones y longitud de la pila.

2.4 Reflexión sísmica (*Sonic echo*)

Al igual que todos los métodos de impacto sísmico, las pruebas de pulso simple (*Sonic echo*) se realizan golpeando la cabeza de la pila con un martillo ligero y la respuesta de la pila se mide con geófonos acoplados a la cabeza de la pila. El golpe de martillo genera una compresión. La onda compresiva es en parte reflejada de vuelta hacia la cabeza de la pila por cualquier cambio en las propiedades elásticas del material. Estos cambios pueden ser resultado de la base, defectos en la pila o cambios en la densidad del concreto (Davis & Dunn, 1974).

A partir de la velocidad (V_P) y el intervalo de tiempo (t), entre el golpe del martillo y el arribo de las ondas reflejadas en los diferentes geófonos, es posible definir la distancia recorrida por la onda V_P , determinar la longitud y la continuidad de la pila (Carino, 2004).

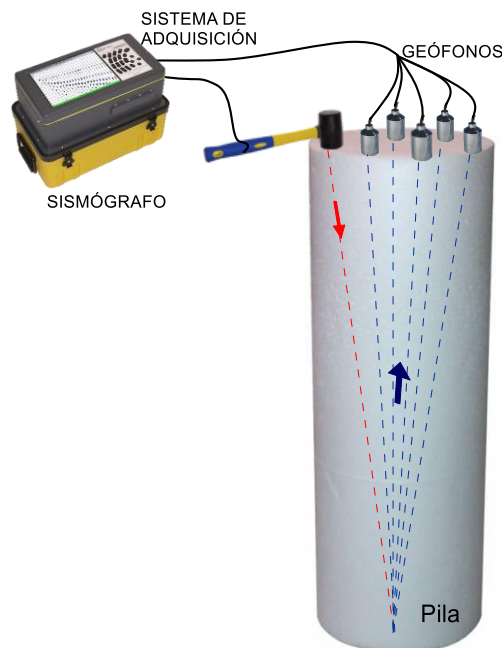


Figura 2.6 Sistema de Reflexión Sísmica (*Sonic echo*) para el ensayo de pila y pilotes.

2.4.1 Instrumentación

El impacto aplicado axialmente a la cabeza de la pila es generado por un martillo con un peso de 2 kg, produciendo un pulso con un tiempo de contacto menor a 1 ms y una frecuencia impartida a la estructura menor a 1200 Hz. Se ha comprobado que utilizar martillos con un peso mayor a 1 kg da mejores resultados para pilas con diámetros mayores a 1 m (Hertlein & Davis, 2007).

Las vibraciones generadas en el cabezal se registran mediante tres geófonos verticales (transductor de velocidad), para este trabajo específicamente se utilizó geófonos de la marca *Geospace Technologies* modelo GS-20DX, con una frecuencia natural de 10 Hz y rango de medición típico de 10 Hz – 1 kHz. La sensibilidad tiene una potencia de $0.28 \pm 10\%$ V/cm/s. La curva de respuesta de frecuencia para el geófono se muestra en la figura 2.7. Observe que la respuesta de la curva empieza a aplanarse hasta aproximadamente los 20 Hz.

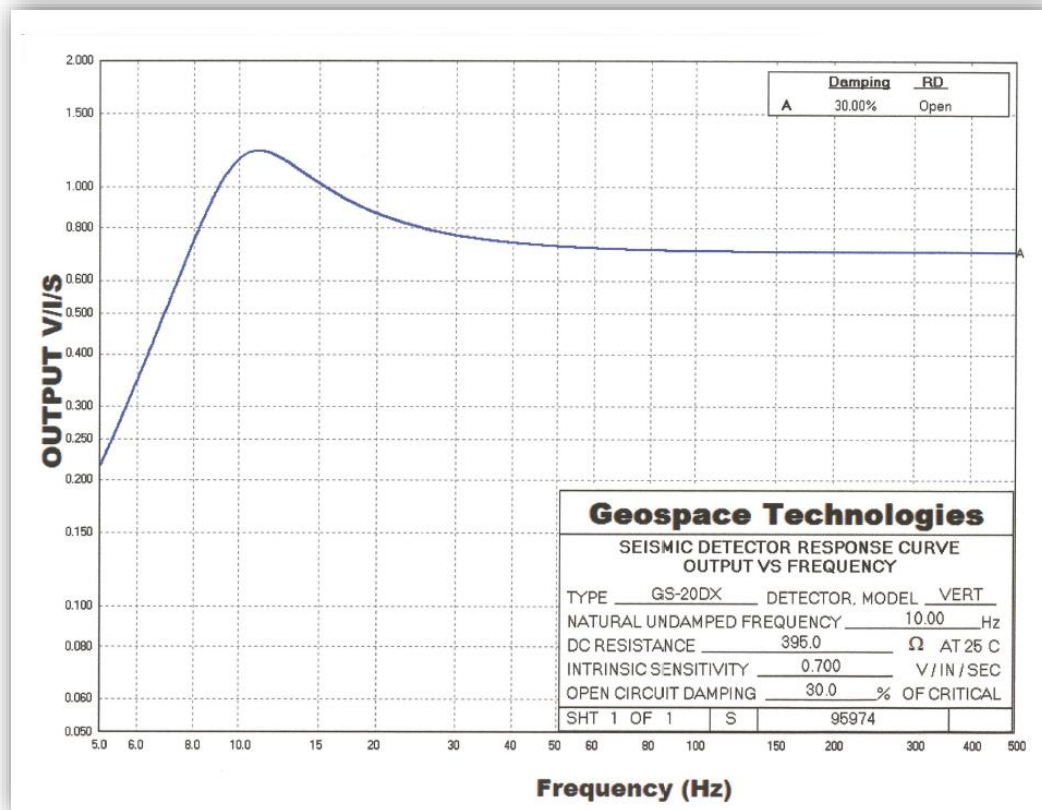


Figura 2.7 Curva de respuesta para un geófono de 10 Hz (Geospace Technologies, 2012).

El equipo para el registro de los datos es un sismógrafo de la marca *Geometrics* modelo Geode multi-propósito conectado a una computadora portátil para la adquisición, análisis, y almacenar los datos; que cumple con los requerimientos solicitados por la norma americana ASTM D5882 (2002), los requerimientos se describen en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Desglose de requerimientos por la ASTM D5882

Artículo	Descripción	Requerimientos	Conformidad
5.1.1.	Aplicación de la fuerza de impacto	Tiempo de contacto menor a 1 ms	Cumple
5.3.	Transmisión de señal	Cable blindado para evitar el ruido de baja frecuencia	Excede (transmisión digital)
5.4.1.	Aparato	Pantalla gráfica permanente	Ofrecido (pantalla de la computadora)
5.4.1.	Aparato	Capacidad de almacenamiento de datos	Ofrecido (ordenador disco duro)
5.4.1.	Aparato	Capacidad promedio de golpes	Ofrecido por software
5.4.1.	Aparato	Amplificación variable	Ofrecido por software
5.4.1.	Aparato	Capacidad de filtrado	Ofrecido por software
5.4.2.	Aparato de grabación	12 bits resolución A / D	Excede (24 bits)
5.4.2.	Frecuencia de muestreo	≥ 30 kHz	Excede (32 kHz, intervalo de muestreo: 0.03125 ms)
5.4.2.	Variación de tiempo	$\leq 0.01\%$	Excede

(Tabla numerado en el orden del documento D5882-07 ASTM)

2.4.2 Adquisición

Al igual que todas las pruebas de integridad de baja deformación, y como se mencionado a detalle en el ensaye PET, la prueba de sísmica de reflexión debe efectuarse después de tres o cuatro semanas luego del colado, únicamente se requiere el descabezado de la pila, una superficie limpia y que el sensor este acoplado a la cabeza de la pila mediante una pasta suave.

El impacto se genera utilizando un martillo instrumentado con *switch* que activa el inicio de la grabación de la respuesta del geófono. La onda de compresión se propaga por la pila y se refleja en la base (interface concreto – suelo). Si la pila presenta defectos o discontinuidades, éstas también causan reflexiones (Likins & Rausche, 2000).

El tiempo de llegada de las ondas directas aumenta proporcionalmente con la distancia entre el lugar de impacto y los puntos de observación. En consecuencia, la longitud e integridad de la pila se puede evaluar correctamente y evitar los efectos tridimensionales, si el impacto se aplica al centro de la pila, colocando el geófono en una posición mayor al 50% del radio de la pila y en donde forme un ángulo de 90° con respecto al impacto (Chow & Phoon, 2003).

El efecto tridimensional en una pila sana (figura 2.8), se observa en la respuesta de la velocidad inicial que se convierte negativo después del primer pico positivo. Para un martillo típico de 4 cm de diámetro, esta característica se vuelve significativa cuando el diámetro de la pila es de 0.4 m o mayor, y cuando la ubicación del receptor está cerca del punto de impacto (centro de la pila) (Smith & Chow, 1982). Esta respuesta parece a la de una pila con un defecto cerca de la cabeza. Si esto se desconoce dará lugar a una evaluación errónea de la condición de la pila.

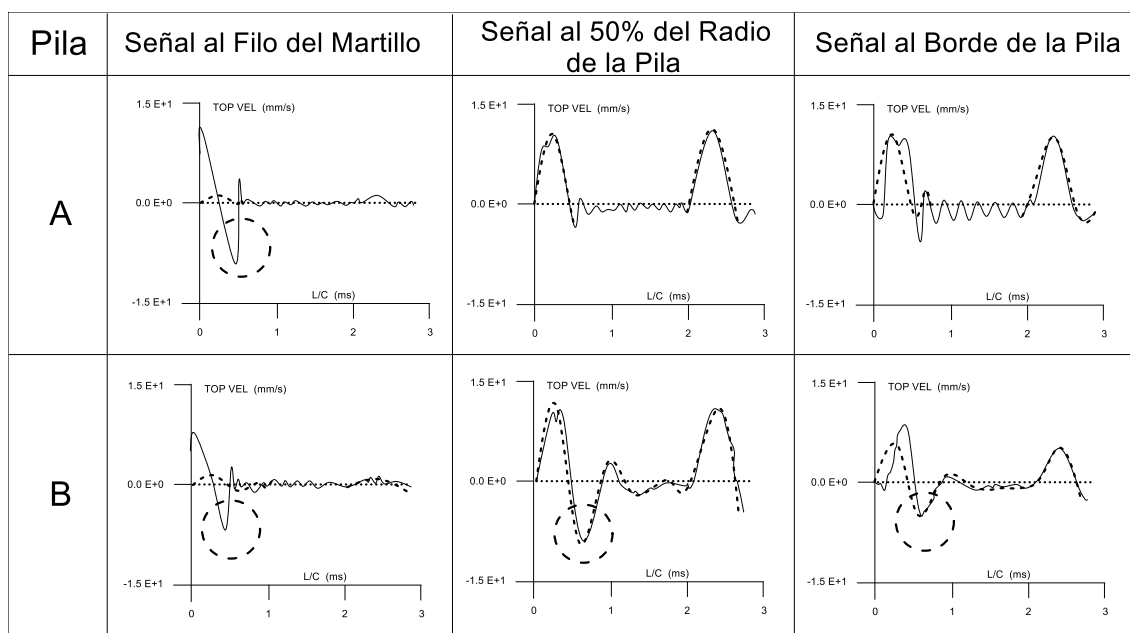


Figura 2.8 Efecto tridimensional en la respuesta de una pila. A) Pila sana, B) Pila con un defecto cerca de la cabeza (modificada de Chow & Phoon, 2003).

Este error puede ser eliminado si se mantiene una distancia entre el martillo y el receptor mayor que 50% del radio (R) de la pila, aproximadamente $0.6 R$ desde el eje de la pila. En la práctica, los componentes de alta frecuencia del pulso de impacto se pueden eliminar mediante un filtro de pasa baja. Por lo tanto, los efectos 3D también se reducirán con el filtrado (Chai, 2010).

Si bien, cuantificar el efecto tridimensional es una tarea complicada, el tener un conjunto de registros para una misma pila, nos permite tener un mejor conocimiento de la propagación de las ondas y descartar ruido externo y efectos tridimensionales. Por esta razón, se ubican dos puntos de impacto, cada impacto con tres geófonos a diferentes distancias operados simultáneamente, muestreados en un rango de 30 ms. A partir de esta distribución se obtienen seis registros (trazas) que se almacenan digitalmente para su procesamiento.

2.4.3 Procesamiento e Interpretación

Para el método de pulso sísmico, la integridad de la pila se evalúa mediante la identificación y el análisis del tiempo de viaje, dirección fase y la amplitud de las reflexiones medidas por el geófono en el dominio del tiempo.

La exactitud de la evaluación de integridad depende de la relación entre área - profundidad del defecto y la fricción del suelo circundante (Ni & Huang, 2012). Los efectos de la interacción suelo-pila han sido ampliamente estudiados por Pavlakovic, 1998; Hanifa, 1999 y Chao, 2002. De manera general y como se ha mencionado en el PET, suelos friccionantes reducen el porcentaje de energía reflejada a la superficie.

El registro de reflexión sísmica para una pila sana muestra sólo dos reflexiones significativas, la primera al inicio producida por el impacto (onda directa), y la segunda producida por la base de la pila. Un registro típico del tiempo de viaje (traza) para una pila sana se muestra en la figura 2.9.

Debido a que la atenuación de la señal se incrementa con la distancia del viaje, es conveniente amplificarla exponencialmente (incrementos con el tiempo) para poder identificar reflexiones débiles provenientes de las proximidades de la base de la pila. Se debe tener mucho cuidado en la aplicación de esta función, ya que también amplifica el ruido de fondo.

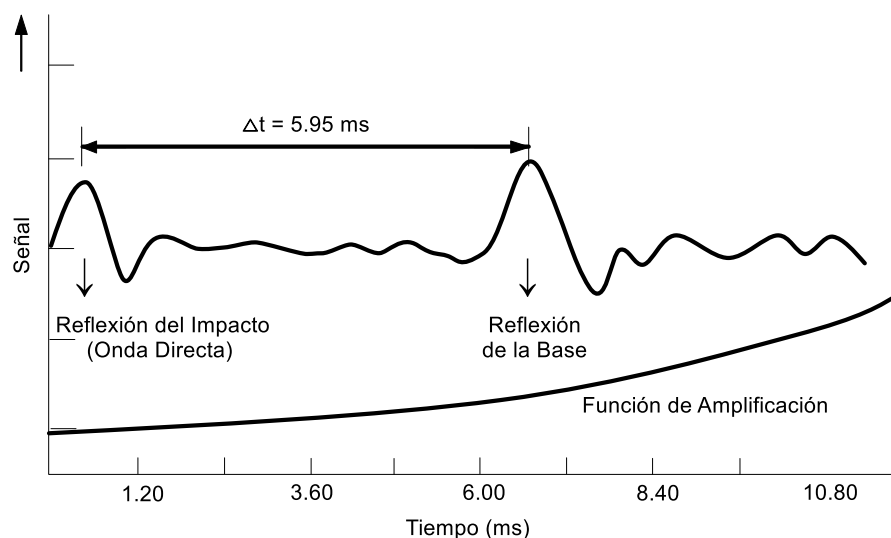


Figura 2.9 Registro típico de la respuesta de un ensayo de reflexión sísmica en una pila sana en el dominio del tiempo. (modificada de Hertlein & Davis, 2007).

Como ya se ha descrito en la sección 1.5.3 y al igual que el PET, si la pila a ensayar presenta defectos o discontinuidades, los registros resultantes mostraran reflexiones asociadas a éstos. La distancia (L) del geófono al reflector producido por la base de la pila o algún defecto, se determinada por la ecuación empleada en sismica de reflexión para el caso de velocidades constantes y reflector horizontal (vea anexo D):

$$L = \frac{1}{2} \sqrt{V_p^2 \Delta t^2 - x^2} \quad (\text{Ecuación 2.4.1})$$

Donde V_p es la velocidad de la onda P en la pila ensayada, Δt el diferencial del tiempo (figura 2.9) y x la distancia horizontal del punto de tiro al geófono (figura 2.10).

El valor de V_p se puede calcular de los resultados obtenidos mediante ultrasonido, por lo tanto el tiempo de arribo de la onda (t), leído en los registros o sismogramas, dará una estimación de la longitud de la pila o la profundidad a cualquier otra superficie reflectante dentro de la pila. Si se conoce la longitud de la pila, se puede realizar una comparación entre la longitud calculada a partir del resultado de la prueba y la longitud conocida, con el fin de verificar que la profundidad a la superficie reflectante es correcta.

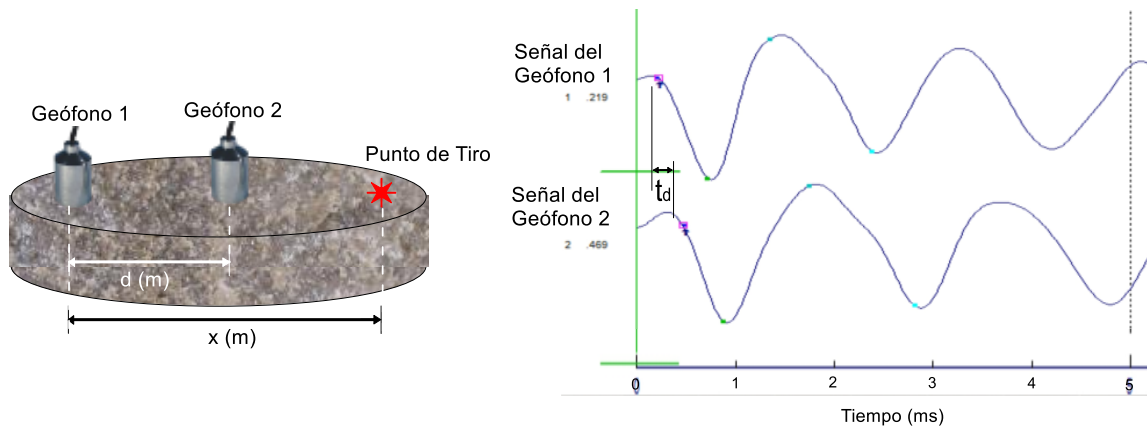


Figura 2.10 Metodología propuesta por Abramo (2011) para medir la velocidad de la onda directa V_D .

Un cálculo analítico del valor de V_P , se efectúa midiendo la diferencia de tiempo del arribo los geófonos colocados a una distancia conocida. Para medir la velocidad de la onda P simplemente se mide el tiempo de retardo (t_d) entre el arribo de los picos iniciales registrados por los geófonos colocados a una distancia conocida (d), como se muestra en la figura 2.10.

Dado que el pico inicial es de la onda de superficie, se puede calcular la velocidad de la onda directa (V_D) dividiendo la distancia (d), por el tiempo de retardo (t_d) de las dos señales recibidas (Abramo, 2011) siendo:

$$V_D = \frac{d}{t_d} \quad (\text{Ecuación 2.4.2})$$

Sansalone ha demostrado que la velocidad de la onda V_P se puede calcular a partir de la velocidad de la onda directa (V_D) (Sansalone & Streett, 1997), mediante la siguiente ecuación:

$$V_P = \frac{1+\nu}{0.87+1.12\nu} \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} V_D \quad (\text{Ecuación 2.4.3})$$

Siendo ν , el módulo de Poisson en el concreto obtenido mediante una Prueba de Compresión realizada a un núcleo extraído de la pila (ASTM C469M, 2014).

El análisis para la evaluación de la integridad en la pila también se puede realizar en el dominio de la frecuencia, sin embargo, la interpretación de los datos de reflexión para la integridad en pilas parece más precisa en el dominio del tiempo.

En el análisis de frecuencia se utiliza la función fuerza - tiempo. Al aplicar la transformada de Fourier a esta función se representa la serie de ondas generadas por el martillo a diferentes frecuencias. Al analizar este espectro, la frecuencia contenida en el impacto puede ser determinada. Y por consiguiente determinar la longitud de la pila y el tamaño de las irregularidades observadas.

En el dominio de la frecuencia, las frecuencias dominantes correspondientes a la longitud de la pila se pueden observar claramente como picos en múltiplos (figura 2.11), que coinciden con la resonancia teórica de una estructura en forma de barra. La distancia del geófono a la reflexión producida por la base de la pila puede ser correlacionada con frecuencia de resonancia del concreto, mediante la siguiente ecuación:

$$L = \frac{V_P}{2\Delta f} \quad (\text{Ecuación 2.4.4})$$

Donde Δf es el diferencial de frecuencia como se muestra en la figura 2.11

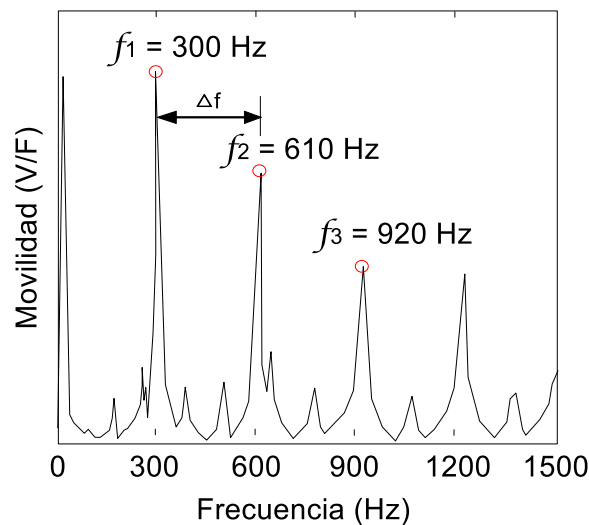


Figura 2.11 Registro típico de la respuesta de un ensaye de reflexión sísmica en una pila en el dominio de la frecuencia (modificada de Ni & Huang, 2012).

Se ha observado que para una pila sana, al tener distintos puntos de impacto y posiciones de los geófonos, se perciben pequeños picos en el medio de las frecuencias dominantes, que pueden ser confundidos con defectos (excepción cuando el geófono se ubica a 90° con respecto al punto de impacto, figura 2.12 y 2.13) (Ni & Huang, 2012).

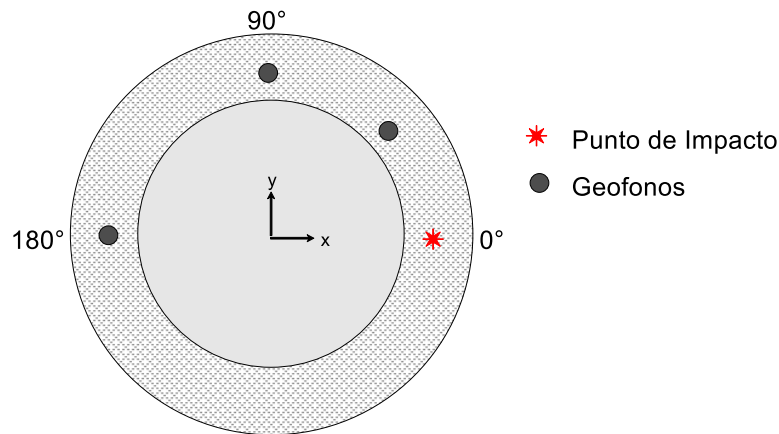


Figura 2.12 Posición de los geofonos con respecto al punto de impacto.

En la figura 2.13, se tiene para una pila sana y para una pila con defecto, tres diferentes trazas y sus correspondientes espectros de frecuencia en función de la posición del geófono. Se observa que el espectro de frecuencia varía significativamente dependiendo de la posición, en consecuencia, cuantificar la influencia de la posición del geófono y la identificación de los defectos se torna difícil, e incluso la pila sana se puede confundir con una pila con defectos cuando se opta por el análisis en el dominio de la frecuencia. Una evaluación suficientemente precisa de la profundidad del defecto se puede obtener cuando el ángulo relativo entre el impacto y los receptores es menor a 90° (Ni & Huang, 2012).

Por el contrario, la interpretación de los resultados en el dominio del tiempo es más clara, además, los resultados en la evaluación de la integridad no se ven afectados de manera significativa por la posición impacto – geófono o el ángulo relativo entre el impacto y el defecto, la única variación radica en el tiempo de llegada de las ondas y la amplitud de las reflexiones. Esto entonces justifica que el análisis presentado se realice en el dominio del tiempo.

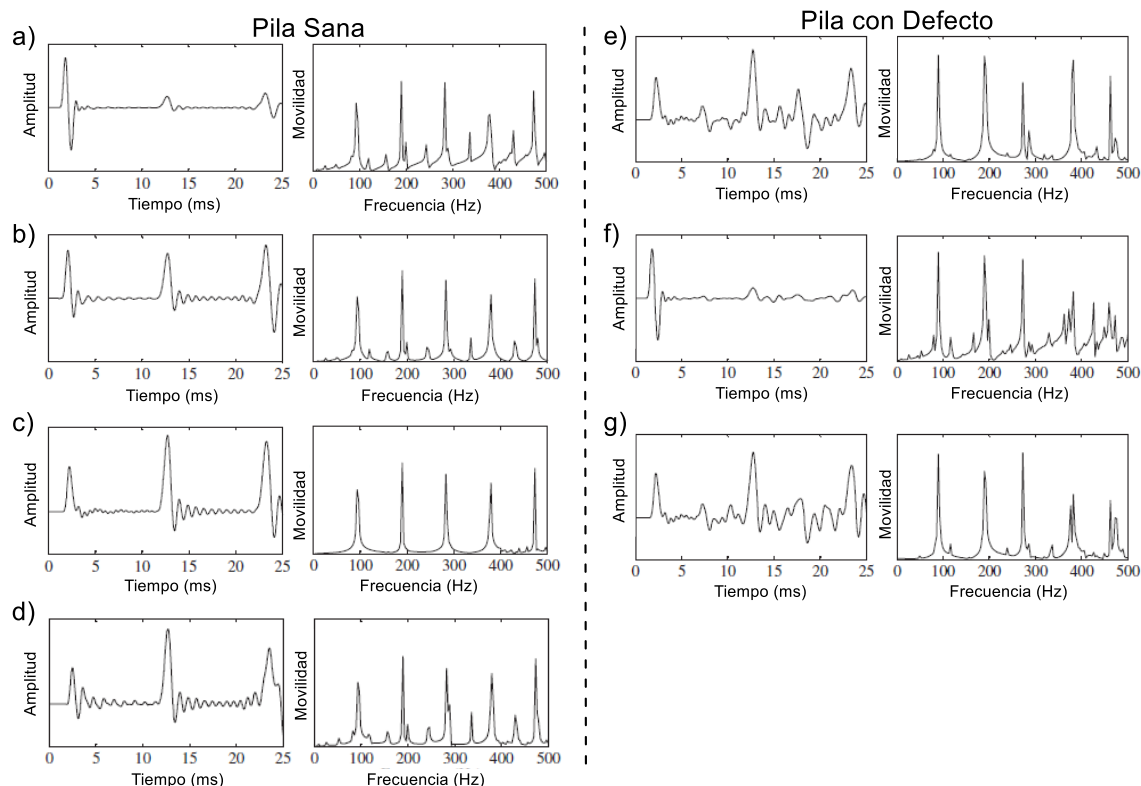


Figura 2.13 Comparación de los resultados obtenidos con geófonos en diferentes posiciones, en el análisis del tiempo y de la frecuencia para: a) - e) geófono ubicado a 0° con respecto al punto de impacto; b) - f) geófono ubicado a 45° con respecto al punto de impacto; c) - g) geófono ubicado a 90° con respecto al punto de impacto; d) geófono ubicado a 180° con respecto al punto de impacto (modificada de Ni & Huang, 2012).

La prueba de reflexión sísmica tradicional sólo puede detectar la ubicación de los defectos y estimar la velocidad de la onda V_P a través de la pila, sin definir el tipo de defecto al que corresponde. Sin embargo la prueba es calificada como una que permite la determinación suficientemente precisa de la existencia de algún tipo de defecto, para poder asegurar la correcta o deficiente integridad de la pila ensayada.

La prueba de pulso simple (*Sonic echo*) puede ser aplicada a las cabezas del eje accesibles, así como cabezas de ejes inaccesibles (Finno, Gassman, & Osborn, 1997).

El éxito de la prueba se debe, en gran medida, a la experiencia del intérprete.

CAPITULO 3. CASO PRÁCTICO: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

En este capítulo se presenta la aplicación de la metodología propuesta en dos sitios: el “A” en el que se conoce la longitud teórica de la pila y el “B” en el que la profundidad es información omitida. Los resultados del sitio A abordan la situación práctica en la que la pila tiene buena integridad, mientras que en el caso del sitio B se discuten los pasos y criterios cuando se evalúa el nivel de integridad del concreto ante la presencia de defectos. Este par de ejercicios permiten definir el comportamiento característico de una cimentación con o sin defectos.

Para el ensayo PET, el trabajo en campo consiste en los pasos de instrumentación y adquisición descritos en la sección 2.3.1 y 2.3.2. El acelerómetro se coloca al centro de la cabeza de la pila, fijado con gel comercial para asegurar su alineación con el eje de la pila. El golpe de martillo se efectúa varias veces en un mismo punto a una distancia de 30 cm del acelerómetro (figura 3.1). Para mejorar las señales obtenidas, se recurre al software adjunto al instrumento, utilizando filtros de alta y/o baja frecuencia, y la amplificación de la señal.



Figura 3.1 Distribución del acelerómetro e impacto para el ensayo PET (Pile Echo Test).

Posteriormente se realiza la prueba de Reflexión sísmica, básicamente en campo el trabajo consistió en los pasos de instrumentación y de medición como se describen la sección 2.4.1 y 2.4.2. Se instalaron 3 geófonos distribuidos en la mitad del perímetro de cada pila, separados entre sí de 0.3 a 0.6 m (figura 3.2) dependiendo de las condiciones físicas y de acceso a cada elemento. En la otra mitad del perímetro se efectuaron dos puntos de tiro (esta distribución se utiliza para todas las pilas ensayadas en este trabajo). De esta prueba se obtuvieron dos registros (de tres trazas cada uno) para cada una de las pilas ensayas.

El impacto es generado por un golpe de martillo acoplado a un sismógrafo de 12 canales en el que se registran los tiempos de arribo a cada geófono. Esta información se almacena para su posterior proceso en gabinete.

La duración de la fuerza de impacto en estos ejercicios fue de alrededor de 1 ms. Como se menciona en la sección 1.4.3, esto implica que las frecuencias significativas hasta 1000 Hz están contenidas en este impulso (vea figura 3.6).

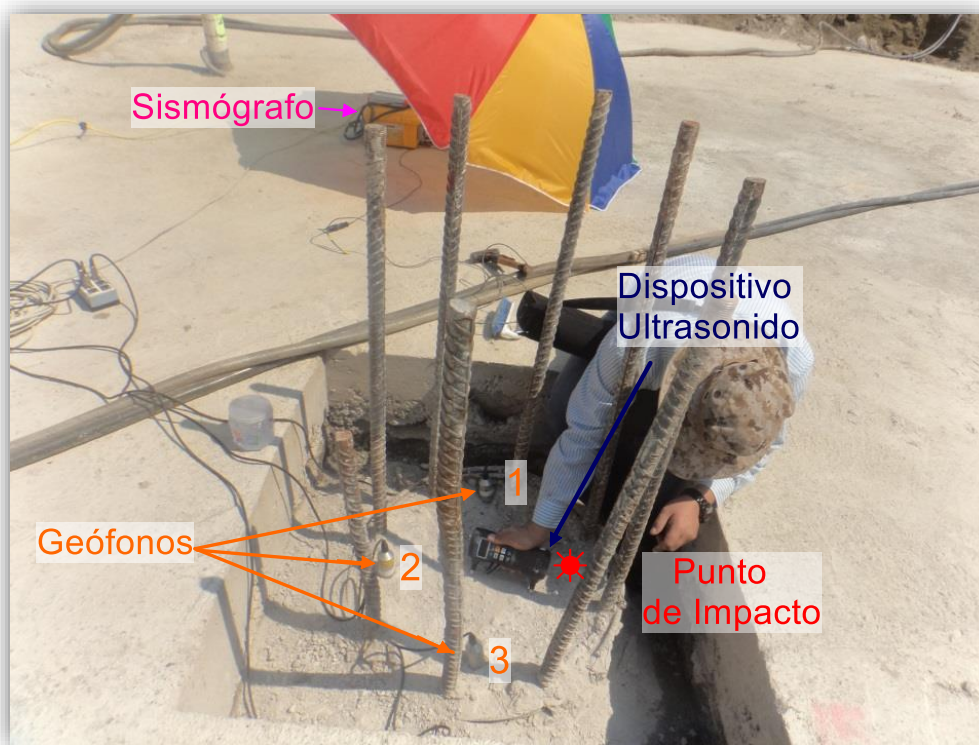


Figura 3.2 Distribución de los geófonos en la prueba de sísmica de reflexión.

Esta misma operación se realizó en cada pila seleccionada. En campo se determinó la V_P en el concreto mediante ultrasonido y se obtuvo así un primer dato sobre la calidad del concreto, por lo menos en la zona superior, cercana a donde se lleva a cabo la prueba.

Finalmente los resultados obtenidos de ambas pruebas se compararon para obtener una mejor interpretación de la integridad de la pila ensayada.

3.1 Sitio “A”

La prueba se realizó antes de la construcción del cabezal de la pila, por lo que se tiene una condición de prueba ideal, es decir muy accesible. El equipo utilizado para este programa de pruebas es como el descrito en las secciones 2.3.1 y 2.4.1. La velocidad es medida en función del tiempo y almacenada digitalmente para su análisis.

La pila analizada tiene un diámetro de 0.85 m y una longitud conocida de 18.7 m. La velocidad promedio que se obtienen a partir de la prueba de ultrasonido es de 3950 m/s (según la tabla 1.1 del Capítulo 1 y 2.3 del Capítulo 2, esta velocidad se asocia con un concreto de buena calidad).

Los resultados que se obtienen mediante el PET son registros claros sin reflexiones asociadas defectos de importancia. En la figura 3.3 se muestra el registro PET de esta pila (promedio de la respuesta de cinco impactos). De la inspección visual de esta señal se desprende:

- la respuesta para los diferentes impactos no presenta variación, lo que nos sugiere que la onda presenta una trayectoria definida y una buena propagación a través del concreto.
- cerca de la base de la pila se observa una pequeña reflexión que probablemente se deba a un ligero ensanchamiento de la parte inferior, se interpreta que no afecta en la integridad de la pila.
- tomando la velocidad obtenida por ultrasonido, la profundidad calculada (longitud de pila) es de 18.6 m, error de 10 cm con la profundidad conocida.

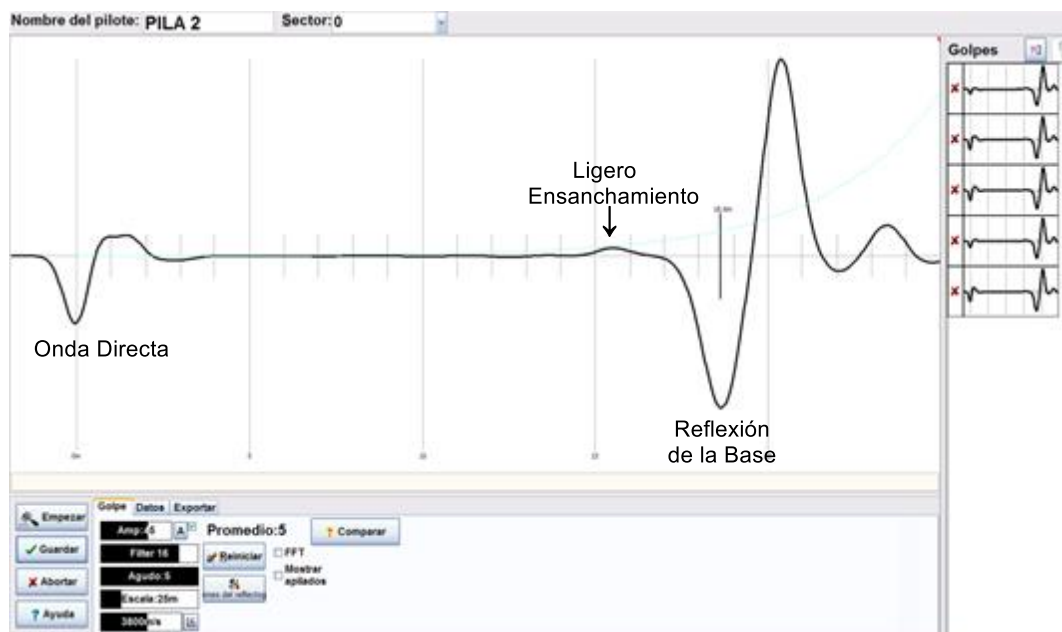


Figura 3.3 Registro obtenido de la prueba PET para una pila sana.

En la prueba de Sísmica de reflexión los geófonos se colocaron a aproximadamente 10 cm desde el borde de la pila (dentro de la estructura de refuerzo) distribuidos en mitad del perímetro de la pila, separados entre sí de 0.3 a 0.5 m, dependiendo de las condiciones físicas y de acceso a cada pila. En la otra mitad del perímetro se efectuaron los dos puntos de tiro. Antes de proceder al análisis de velocidad y profundidad de las pilas es necesario procesar los registros haciendo pasar un Filtro Pasa Alta de 1000 Hz (relacionado con las frecuencias contenidas en el impulso emitido por el impacto).

Los registros obtenidos mediante sísmica de reflexión corroboran lo antes sugerido (conclusión obtenida con PET) puesto que: i) no muestran reflexiones significativas asociadas a defectos de importancia y ii) la reflexión de base es fácilmente identificable. Cabe señalar que en uno de estos registros, mostrados en la figura 3.4, se observan múltiples o reverberaciones en el registro perteneciente al geófono 2. Sin embargo estos efectos se asocian a la posición del geófono con respecto al punto de tiro (vea la figura 2.12), puesto que el geófono 2 se ubicó a 180° del punto de tiro (figura 3.2).

Es importante señalar que estos registros muestran de forma más detallada la propagación de onda por la pila y debe ser tomado muy en cuenta cuando se interpretan las señales.

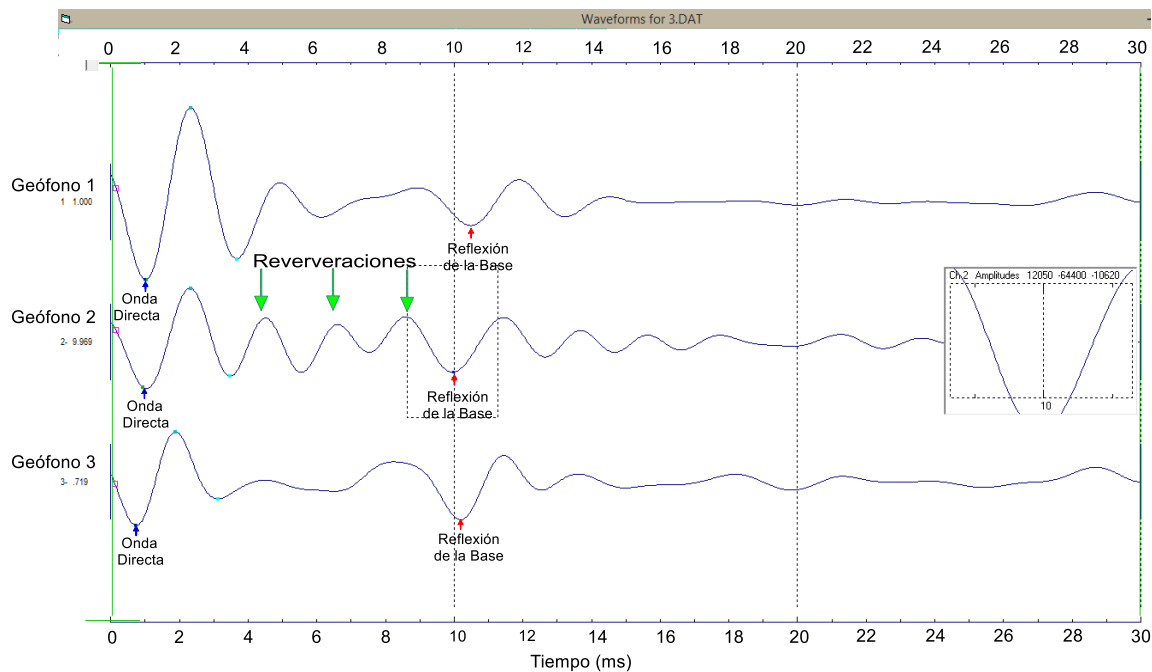


Figura 3.4 Registro obtenidos mediante sísmica de reflexión, donde se observa la reflexión producida por la onda directa y la base de la pila.

Para obtener la velocidad de la onda V_P , a partir de la V_D (onda directa), observamos que para los geófonos 1 y 2 (más lejanos al punto de tiro) el tiempo de arribo de la onda V_D es de 1.0 ms, mientras que para el geófono 3 (el más cercano) el tiempo de arribo corresponde a 0.85 ms (figura 3.5). Utilizando la ecuación 2.4.2, 2.4.3, considerando un módulo de Poisson de 0.2 típico del concreto (ya que no se tuvo acceso a pruebas de compresión), y tomando en cuenta los geófonos 2 y 3 con una separación de 0.4 m, la velocidad de propagación V_P determinada es de 3900 m/s.

Si comparamos los resultados anteriormente obtenidos, los métodos son consistentes pues la velocidad obtenida por Sísmica de Reflexión de 3900 m/s es aproximada a los 3950 m/s obtenidos mediante la prueba de Ultrasonido.

Para el análisis de la longitud de la pila, a modo de ejemplo, tomaremos la traza del geófono 3 (figura 3.4), del cual se tiene una distancia de 0.4 m al punto de tiro. La traza de la figura 3.6 se caracteriza por un pico de decaimiento rápido, generado por la fuerza de impacto a los 0.75 ms (onda directa), seguida por una reflexión claramente definida en 10.28 ms.

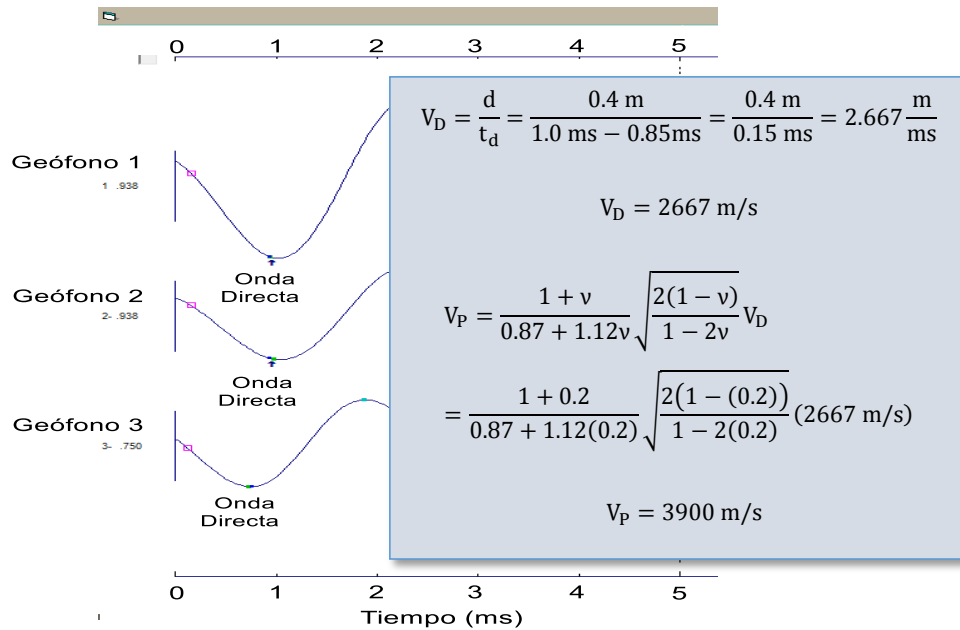


Figura 3.5 Primeros 5 ms del registro de la figura 3.3, donde se observan los tiempos de arribos de la onda directa, para el cálculo de la velocidad V_P .

El análisis de esta misma señal, en el dominio del tiempo, indica que la reflexión a los 10.28 ms, es originada por la base de la pila (como se ha descrito en la sección 2.4.3). Utilizando la ecuación 2.4.1 y tomando la velocidad calculada en la figura 3.5 de 3849 m/s, la longitud de la pila resultante es de 18.6 m.

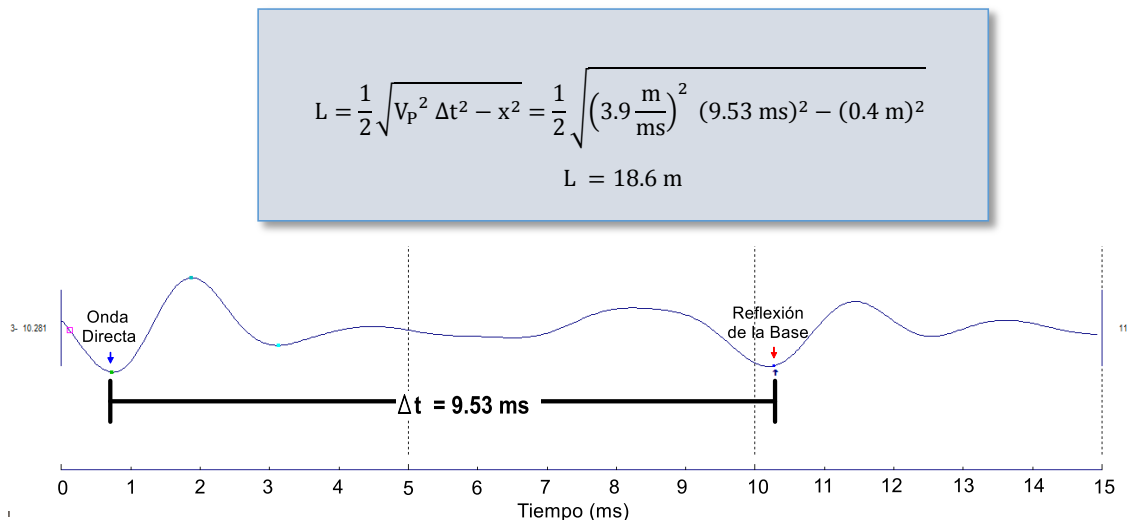


Figura 3.6 Trazo representativa para el cálculo de la profundidad en el dominio del tiempo.

Alternativamente la profundidad se puede obtener mediante el análisis de la frecuencia. El espectro obtenido de la trazas del geófono 3, se muestra en la figura 3.7. La distancia del geófono a la base de la pila puede ser correlacionada con la frecuencia de resonancia mediante la ecuación 2.4.4. De igual forma tomando la velocidad calculada $V_P = 3900$ m/s, y teniendo una frecuencia de resonancia del concreto de 105 Hz, la longitud de la pila resultante es de 18.5 m.

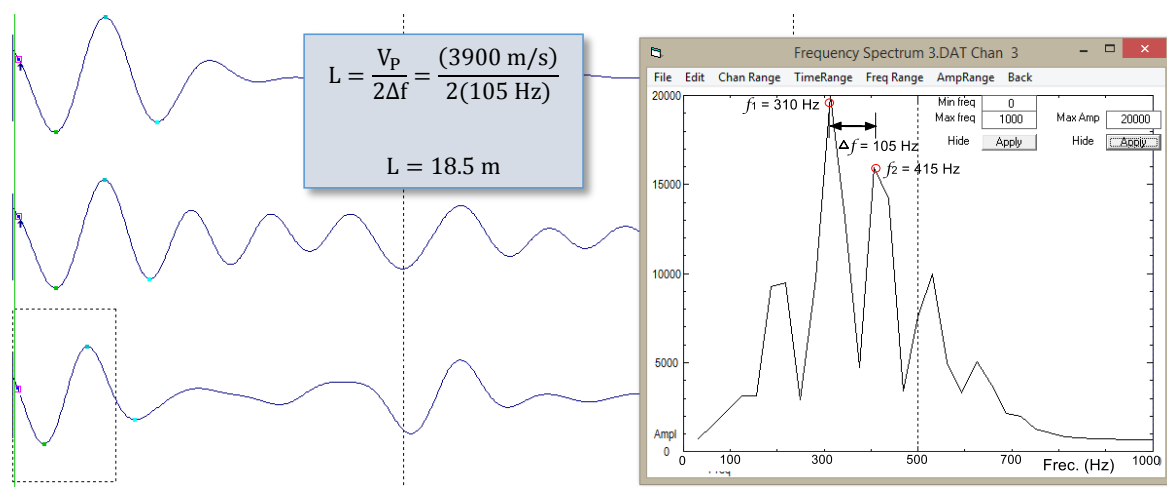


Figura 3.7 Espectro de frecuencia de la trazas perteneciente al geófono 3, utilizado para el cálculo de la profundidad.

La profundidad obtenida tiene un margen de error de ≈ 20 cm comparada con la longitud conocida, lo cual es de esperarse al tratarse de un método indirecto. Esta diferencia se considera aceptable.

Esta pila permite señalar las características que se deben presentar para categorizar a una pila como "sana". Si una pila muestra respuestas claras, semejantes y consistentes se puede considerar (con un alto grado de certeza) que la pila presenta buena integridad.

3.2 Sitio "B"

La prueba se realizó antes de la construcción del cabezal de la pila (30 días después de vertido el concreto) por lo que se tiene una condición de prueba ideal, es decir muy accesible. El equipo utilizado para este programa de pruebas es como el descrito en las secciones 2.3.1 y 2.4.1. La velocidad es medida en función del tiempo y almacenada digitalmente para su análisis.

Siete de las pilas ensayadas fueron verificadas mediante sondeos de avance controlado con barril y recuperación de muestras, a partir de los cuales se corrobora la continuidad y calidad del concreto, los resultados detallados de los sondeos exploratorios se muestran en el Anexo F.

Las pilas analizadas tiene un diámetro de 0.65, 0.80 y 1.00 m. La velocidad promedio obtenida a partir de la prueba de ultrasonido, la profundidad de desplante de diseño, así como la profundidad de desplante registrada en los sondeos para cada pila se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Velocidad de ultrasonido y profundidad de desplante conocida para las pilas del sitio “B”

No. Pila	Diámetro (m)	Velocidad Ultrasonido Promedio (m/s)	Prof. de desplante según sondeo (m)	Prof. de desplante de diseño (m)	Relación L/D (Longitud/Diámetro)
1	0.65	2700	12.10	15.50	18.60
2	0.65	3100	11.15	15.50	17.10
3	1.00	3350	14.70	15.10	14.70
4	0.65	3200	13.10	15.50	20.15
5	0.65	3500	14.30	15.40	22.00
6	0.65	3200	13.20	15.50	20.30
7	0.80	3900	15.15	15.20	19.00
8	1.00	3350	No aplica	13.30	13.30
9	1.00	3500	No aplica	13.30	13.30
10	1.00	3150	No aplica	13.30	13.30
11	1.00	3350	No aplica	13.30	13.30
12	1.00	3400	No aplica	13.30	13.30
13	1.00	3500	No aplica	13.30	13.30
14	1.00	3650	No aplica	13.30	13.30
15	1.00	3700	No aplica	13.30	13.30
16	1.00	3450	No aplica	13.30	13.30
17	1.00	3450	No aplica	13.30	13.30
18	1.00	3450	No aplica	13.30	13.30
19	1.00	3550	No aplica	13.30	13.30

Para la presentación de los resultados obtenidos mediante la prueba PET se adoptara la clasificación cualitativa con base en los cambios de sección observados en los registros, desarrollada por Likins & Rausche (2000):

- A. Respuesta clara sin defectos aparentes. Si el porcentaje de defectos es menor al 20%, la integridad de la pila se considera satisfactoria
- B. Clara indicación de defectos serios. La reflexión producida por la base no se define.
- C. Indicación de posibles defectos, a pesar de tener una reflexión producida por la base definida.
- D. Datos inconclusos.

Para la interpretación de los registros obtenidos por PET (Pile Echo Test), se asume la velocidad promedio obtenida a partir de la prueba de ultrasonido. Los resultados se muestran en la tabla 3.2.

Para la prueba de Sísmica de reflexión los geófonos se colocaron a aproximadamente 10 cm desde el borde de la pila (dentro de la estructura de refuerzo) distribuidos en mitad del perímetro de la pila, separados entre sí de 0.3 a 0.5 m, dependiendo de las condiciones físicas y de acceso a cada pila. En la otra mitad del perímetro se efectuaron los dos puntos de tiro. Antes de proceder al análisis de velocidad y profundidad de las pilas es necesario procesar los registros haciendo pasar un Filtro Pasa Alta de 1000 Hz.

Para determinar la presencia de discontinuidades se analizan las reflexiones existentes en toda la traza, clasificando las reflexiones en tres tipos (señalándolas en el registro por color para su fácil identificación, figura 3.8).

Clasificación las reflexiones:

- onda directa (OD - ↓)
- reflexión por posible discontinuidad (D - ↓)
- reflexión por la base de la pila (B - ↓)

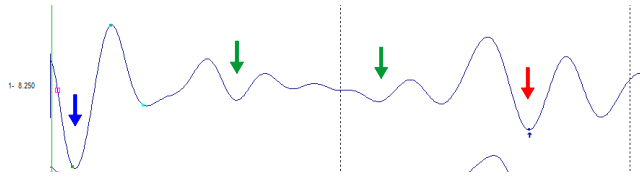


Figura 3.8 Clasificación de las reflexiones observadas en los registros de sísmica de reflexión.

Con base en los sondeos exploratorios del Anexo F, se realiza una correlación cualitativa, entre la integridad de la pila y la respuesta obtenida mediante sísmica de reflexión para esas pilas. Estableciendo el comportamiento de una pila sana, con defectos leves y defectos significativos. Esto con el fin de definir la integridad del resto de las pilas. El análisis y la clasificación de las reflexiones se muestran en la tabla 3.3.

Los resultados se clasifican a partir de las reflexiones observadas en la pila (figura 3.9):

- A. Pila sana: mayor porcentaje de registros donde la traza se caracteriza por un pico de decaimiento rápido, generado por la fuerza de impacto, seguida por una reflexión fácilmente identificable asociadas a la base de la pila, cumple con la profundidad de desplante de diseño y presenta velocidades mayores a 3600 m/s (velocidad asociada a un concreto de buena calidad, tabla 1.1 y 2.3).
- B1. Pila con defectos cercanos al cabezal o rugosidad muy alta a lo largo de toda la pila: Reflexiones asociadas a posibles defectos que se presentan bloqueando la señal de la base, se identifica la reflexión asociada al defecto y presenta velocidades de 2130 m/s a 3600 m/s (velocidad asociada a un concreto de calidad regular, tabla 1.1 y 2.3).
- B2. Pila con defectos significativos: Reflexiones claras, asociadas a defectos que se presentan bloqueando la señal de la base, se identifica la reflexión asociada al defecto y presenta velocidades menores a 2130 m/s (velocidad asociada a un concreto de calidad regular a pobre, tabla 1.1 y 2.3).
- C. Pila con posibles defectos: Por presentar reflexiones asociadas a posibles defectos pero con base identificable, este efecto puede también ser provocado por la posición del geófono y no corresponder a un defecto. Presenta velocidades inconclusas (de 2130 m/s a 3000 m/s).
- D. Datos inconclusos. Registro complejos y sin reflexiones identificables.

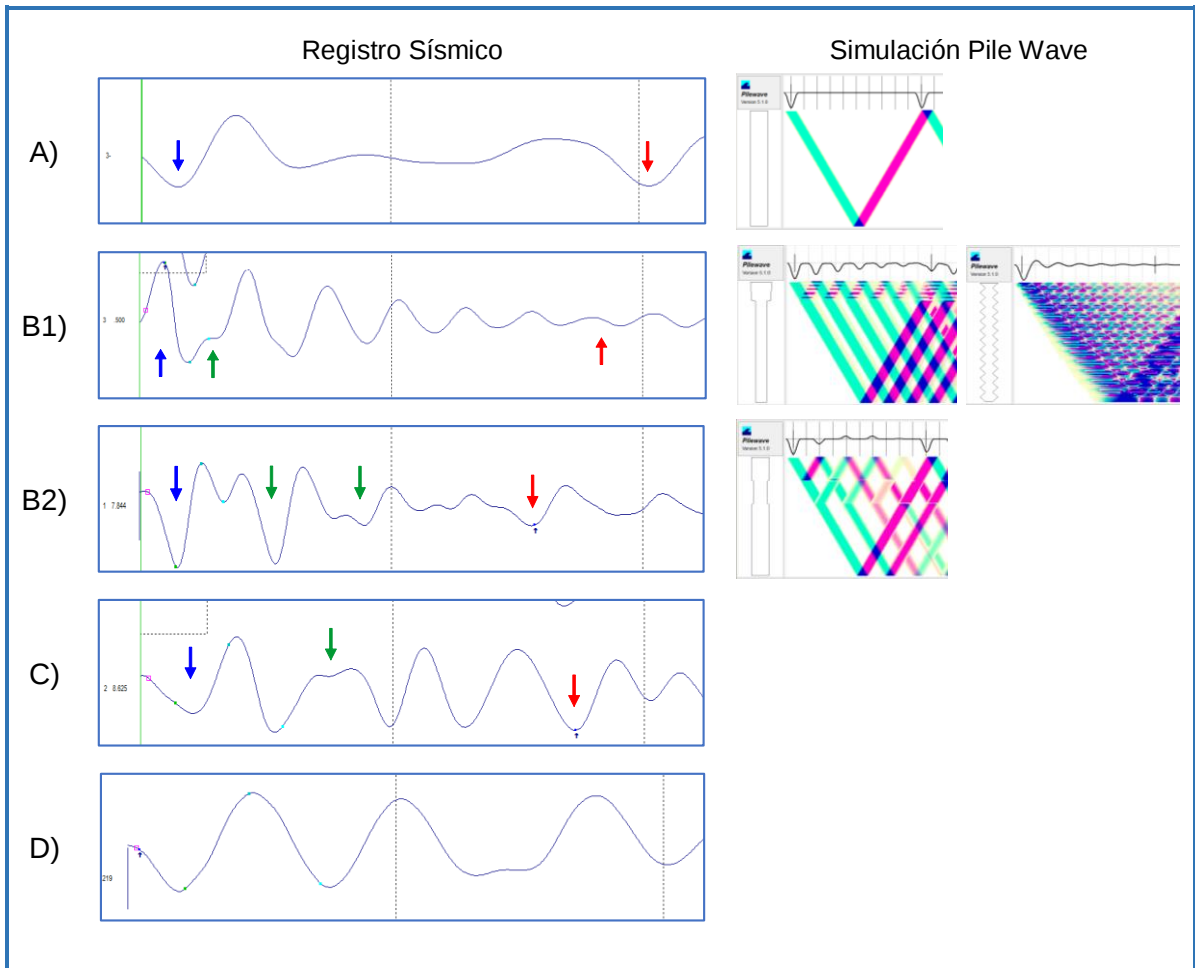


Figura 3.9 Respuestas observadas para: A) Pila sana, B1) Pila con defectos leves cercanos al cabezal o rugosidad muy alta, B2) Pila con defectos significativos, C) Pila con posibles defectos y D) Datos inconclusos

El cálculo de la velocidad se realiza a partir de los tiempos de arribo de la onda directa registrado por dos geófonos, la distancia entre esos dos geófonos y un módulo de Poisson de 0.2 típico del concreto, de acuerdo a las ecuaciones 2.4.2 y 2.4.3 como ya se ha ejemplificado para el Sitio A (sección 3.1).

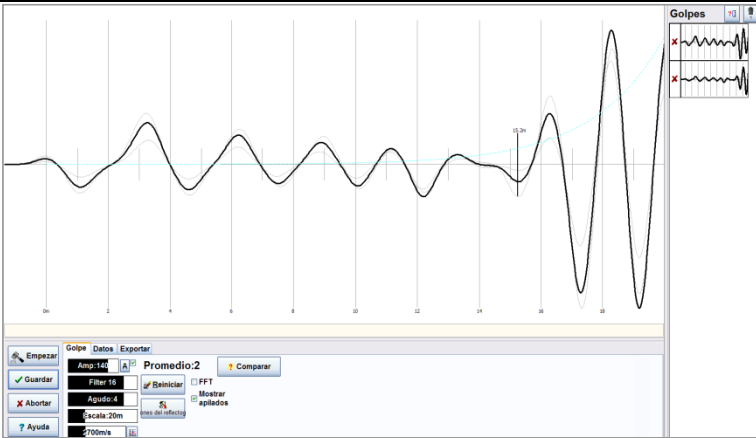
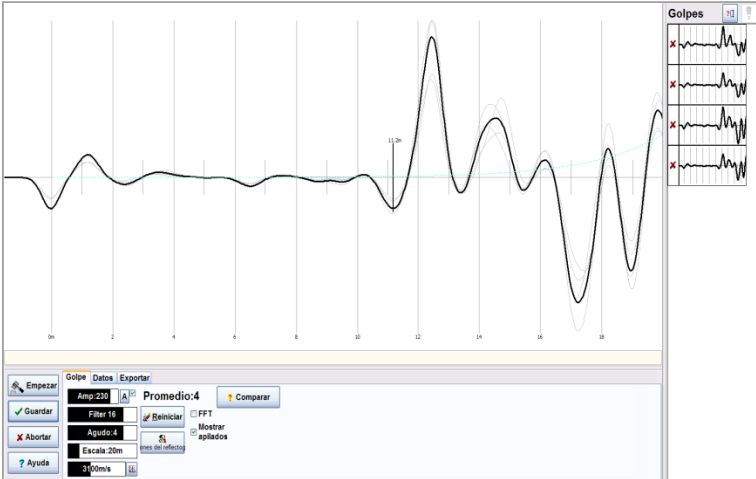
Posteriormente se procede al cálculo de la profundidad total de la pila en función de la ecuación 2.4.1. Se considera la velocidad calculada a partir del procedimiento antes descrito, se debe recordar que en esta prueba se tienen seis trazas para una misma pila, por lo tanto se elige para este análisis el registro con la reflexión más clara asociada a la base de la pila. Los resultados de la clasificación, cálculo de velocidades y profundidad de la pila se muestran en la tabla 3.3.

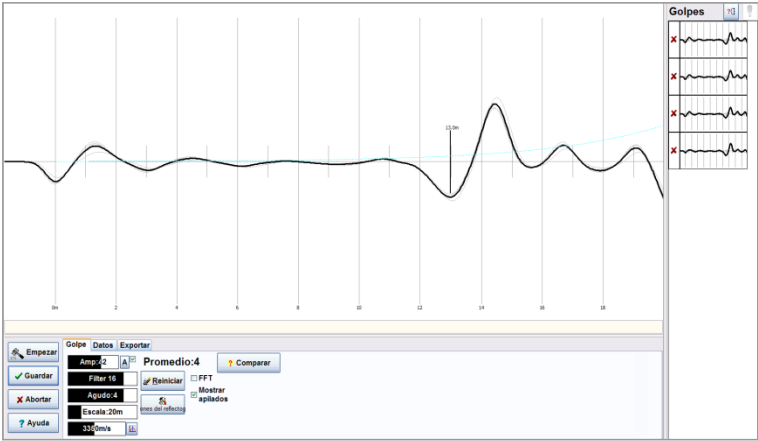
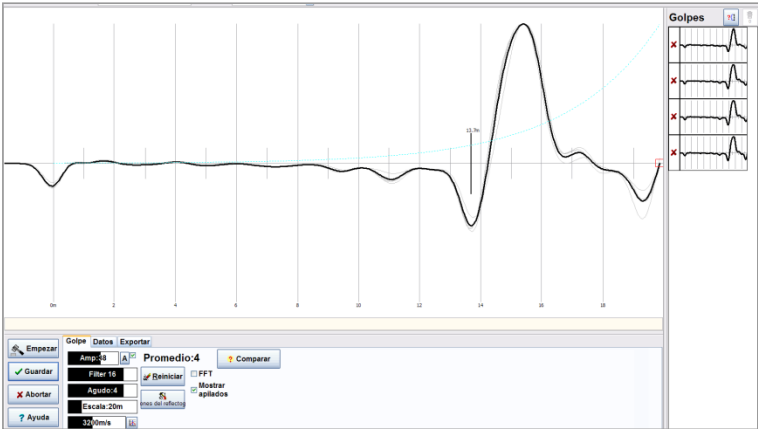
Finalmente se hace la integración de los resultados de Ultrasonido, PET y sísmica de reflexión en la tabla 3.4 y Anexo G, determinando las acciones a tomar para cada caso (Likins & Rausche, 2000). Concluyendo tres casos:

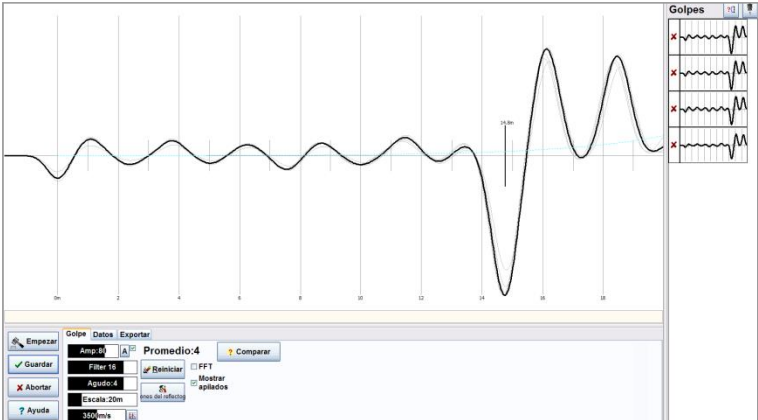
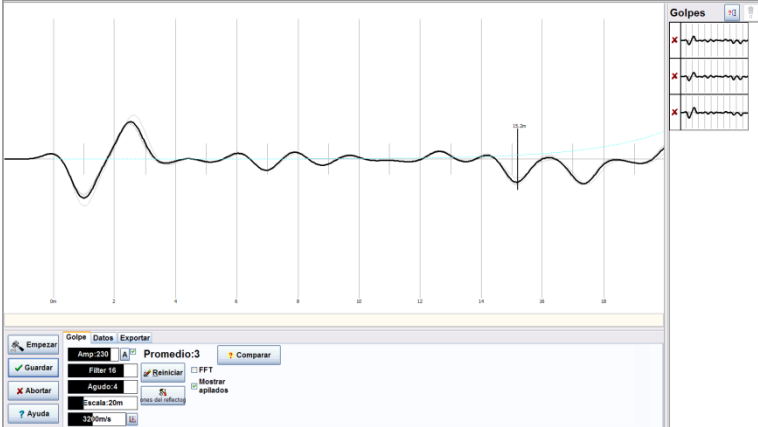
- Si los resultados son favorables en las tres pruebas, con una clasificación A para la prueba de PET y Sísmica de reflexión, y la profundidad de desplante no presenta una variación significativa, y además cumple con la profundidad de desplante de diseño, la pila se puede considerar con una adecuada integridad. Por lo tanto no se sugieren posibles acciones a seguir.
- Si se tiene una combinación en la clasificación de B – B, B – C o C – C, es decir con la presencia de algún defecto que será detallado en las observaciones, o no cumple con la profundidad de desplante de diseño, la pila se considera con mala integridad, en consecuencia se debe poner en marcha un plan de contingencia, empleando medidas correctivas, como remplazo del pilote o inyección, con base en el costo del proyecto.
- Si los resultados no presentan congruencia y se tiene una combinación en la clasificación de A – D, A – B, A – C, o B – D, se considera incertidumbre en los resultados de la prueba. Por lo tanto, se debe considerar la repetición de la prueba o la implementación de otras pruebas como la prueba de carga dinámica, así como la integración de resultados geotécnicos y/o extracción de núcleos.

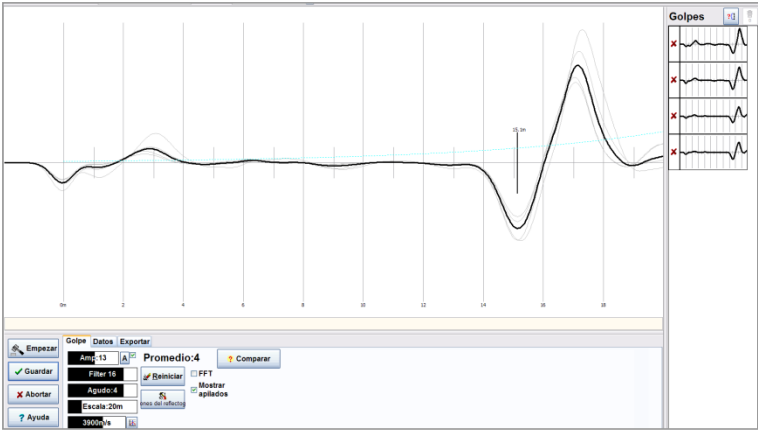
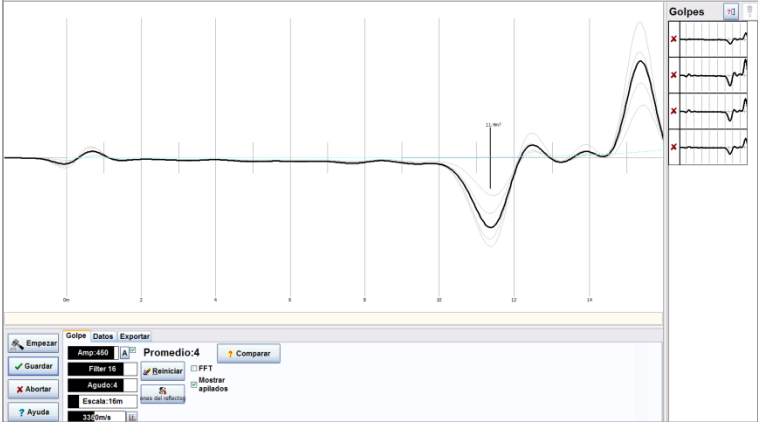
Recuérdese que la velocidad obtenida en la prueba de Ultrasonido es mayor que la obtenida por los métodos de impacto sísmico (vea sección 1.4, 2.2 y Anexo B), lo que se reflejara en el aumento de la profundidad de desplante para la prueba de ultrasonido, factor que se debe considerar al valorar la congruencia en los resultados. Sin embargo, esto no ocurre en todas las pilas analizadas debido a la variación de la velocidad a lo largo de toda la pila, lo que implica que en algunos casos la velocidad por los métodos de impacto sea mayor que la velocidad obtenida por ultrasonido.

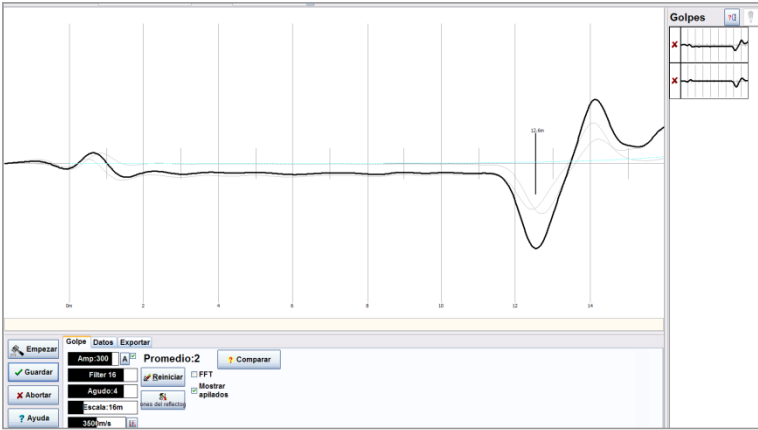
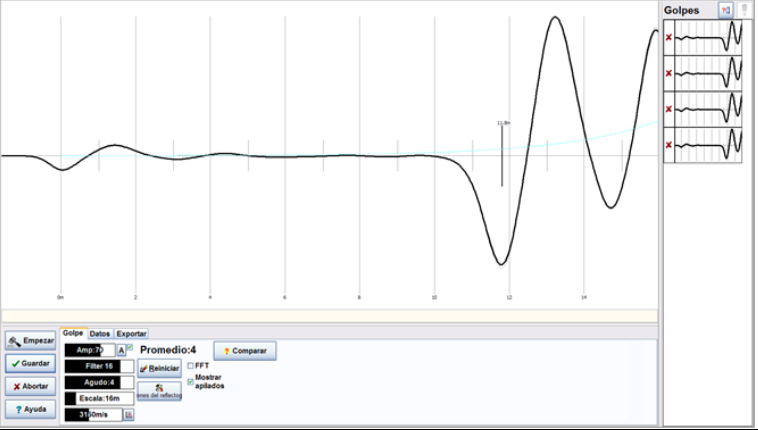
Tabla 3.2 Resultados obtenidos del ensayo PET (Pile Echo Test) para el sitio "B".

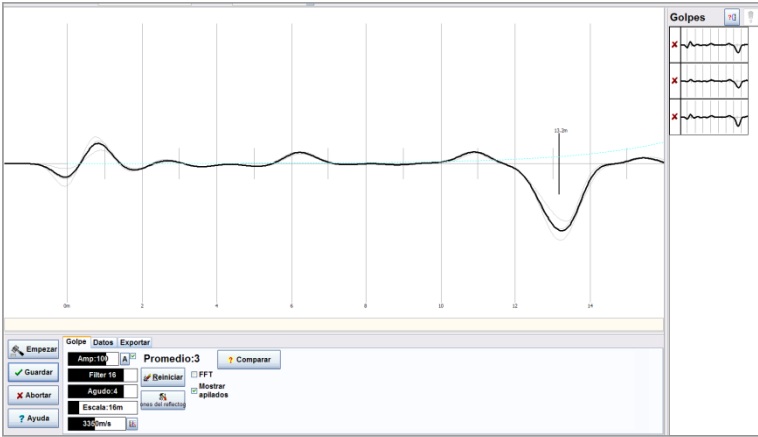
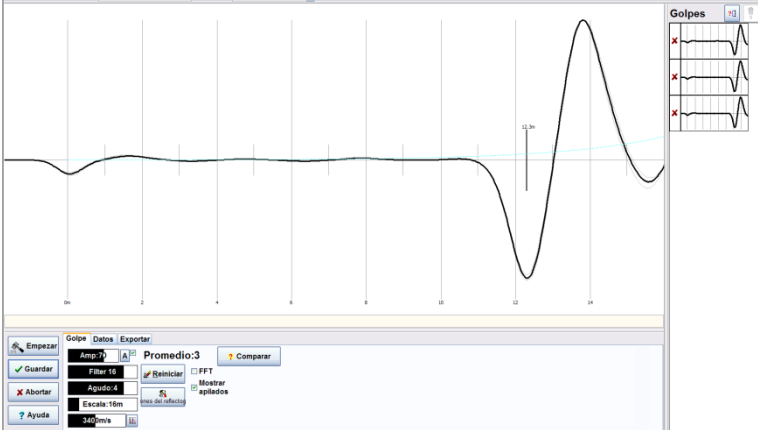
No. Pila	Registro Obtenido	Longitud Calculada (m)	Clasificación (Linkins, 2000)	Observaciones (según sección 2.3.3)
1		12.60	C	Posible defecto localizado en la mitad superior a menos de 6.3 m de prof. La información se corrobora con sondeo y se observa que de 1.40 a 2.70 m de prof., se tiene una recuperación de sólo 0.85 m.
2		11.20	C	Posibles defectos localizados, en la mitad superior a menos de 5.6 m de prof. y en la parte inferior de la pila en el contacto con el suelo. La información se corrobora con sondeo, se observa: - Pérdida de recuperación de 4.15 a 4.75 m. - De 11.15 a 13.35 se tiene una recuperación de sólo 0.83 m. - Se vuelve a tener recuperación de material hasta los 14.85 m de prof.

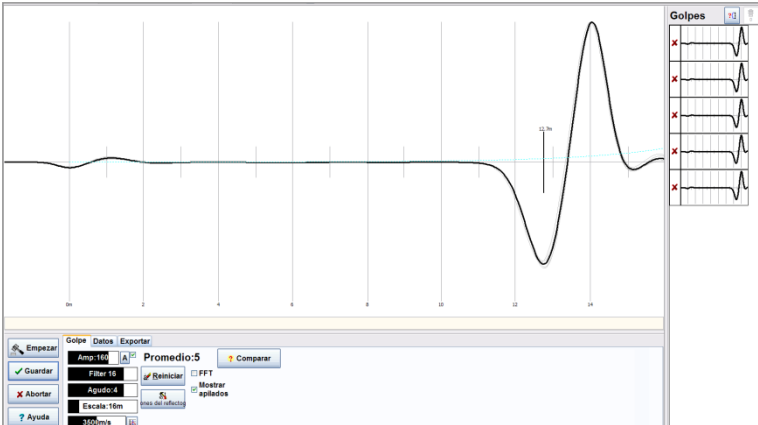
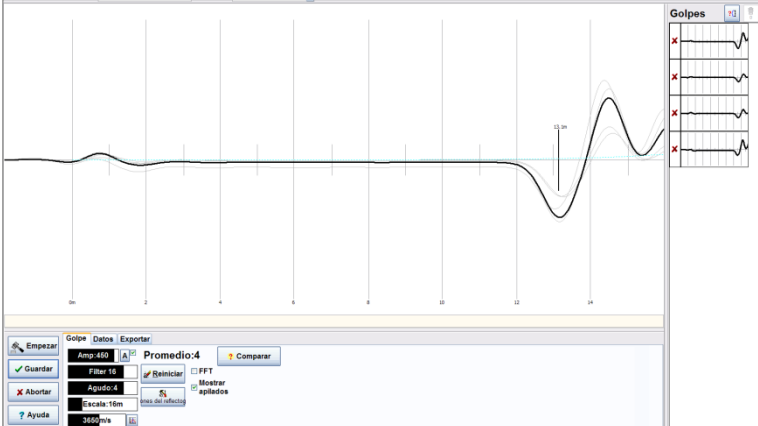
No. Pila	Registro Obtenido	Longitud Calculada (m)	Clasificación (Linkins, 2000)	Observaciones (según sección 2.3.3)
3		13.00	B	Defecto localizado en la mitad superior cerca del cabezal de la pila. La información se corrobora con sondeo y se observa que de 0.70 a 1.60 m de prof. Se tiene una recuperación de sólo 0.38 m.
4		13.70	C	Defecto localizado en la parte inferior de la pila. La información se corrobora con sondeo teniendo una buena recuperación de muestras hasta los 13.10 m.

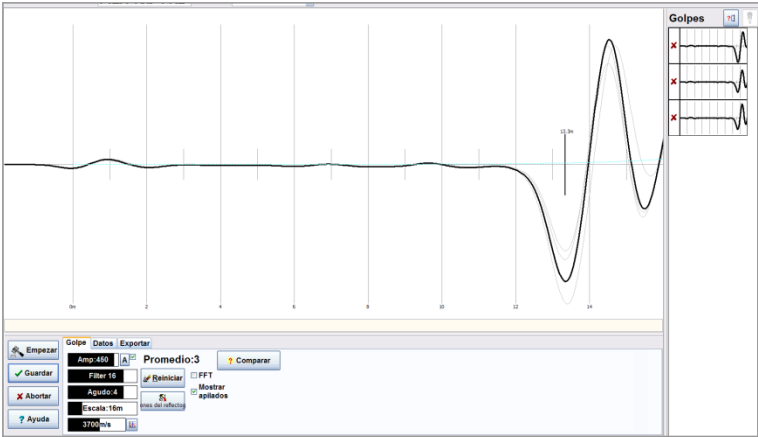
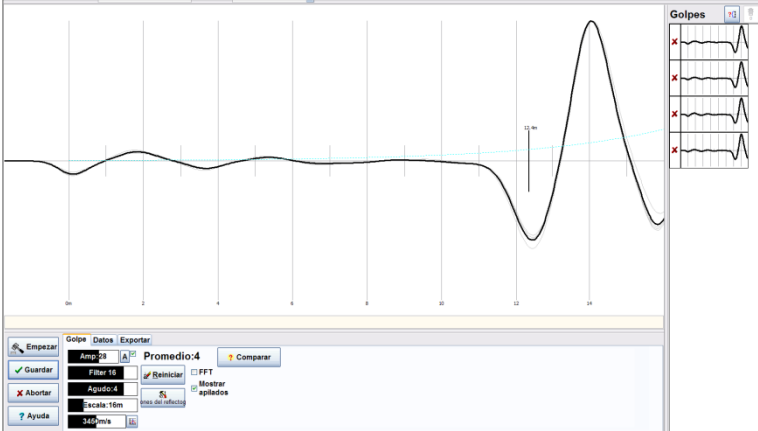
No. Pila	Registro Obtenido	Longitud Calculada (m)	Clasificación (Linkins, 2000)	Observaciones (según sección 2.3.3)
5		14.80	C	Posible defecto localizado en la mitad superior a menos de 7.4 m de prof. La información se corrobora con sondeo, se observa que de 5.4 a 6.10 se tiene una pérdida de recuperación.
6		13.10	B	Defecto localizado en la mitad superior a menos de 6.5 m de prof. La información se corrobora con sondeo y se observa que de 1.0 a 2.20 m de se tiene una recuperación de sólo 0.58 m.

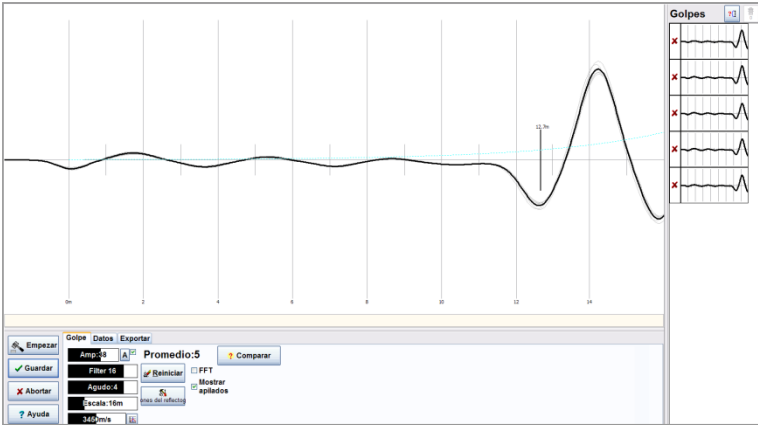
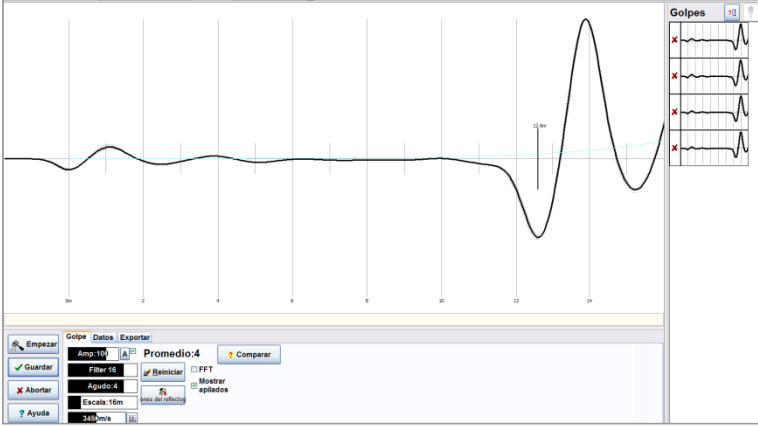
No. Pila	Registro Obtenido	Longitud Calculada (m)	Clasificación (Linkins, 2000)	Observaciones (según sección 2.3.3)
7		15.10	A	Defecto mínimo, se interpreta que no afecta en la integridad de la pila. La información se corrobora con sondeo y se observa que se tiene una excelente recuperación hasta los 7.61 m. De 7.61 a 10.8 sólo se tiene una recuperación de 2.75 m. Por debajo de los 10.8 m de prof. La recuperación retorna a excelente.
8		11.90	A	No muestra reflexiones significativas asociadas a un posible defecto.

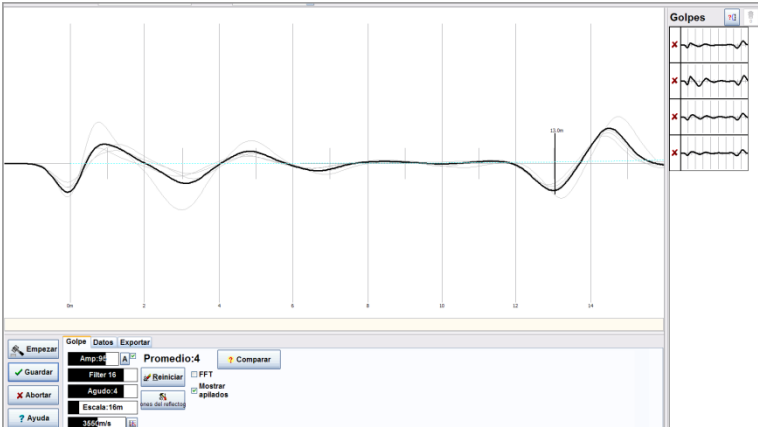
No. Pila	Registro Obtenido	Longitud Calculada (m)	Clasificación (Linkins, 2000)	Observaciones (según sección 2.3.3)
9		12.60	C	Posible defecto localizado, en la mitad superior, a menos de 6.3 m de profundidad.
10		11.80	C	Posible defecto localizado, en la mitad superior, a menos de 5.9 m de profundidad.

No. Pila	Registro Obtenido	Longitud Calculada (m)	Clasificación (Linkins, 2000)	Observaciones (según sección 2.3.3)
11		13.20	B	Defecto localizado en la mitad superior a menos de 6.6 m de prof. o mitad de la pila
12		12.30	A	No muestra reflexiones significativas asociadas a un posible defecto.

No. Pila	Registro Obtenido	Longitud Calculada (m)	Clasificación (Linkins, 2000)	Observaciones (según sección 2.3.3)
13		12.70	A	No muestra reflexiones significativas asociadas a un posible defecto.
14		13.10	A	No muestra reflexiones significativas asociadas a un posible defecto.

No. Pila	Registro Obtenido	Longitud Calculada (m)	Clasificación (Linkins, 2000)	Observaciones (según sección 2.3.3)
15		13.30	B	Defecto localizado en la mitad superior a menos de 6.0 m de prof., o en la mitad de la pila.
16		12.40	B	Defecto localizado en la mitad superior a menos de 6.0 m de prof., o en la mitad de la pila.

No. Pila	Registro Obtenido	Longitud Calculada (m)	Clasificación (Linkins, 2000)	Observaciones (según sección 2.3.3)
17		12.70	B	Defecto localizado en la mitad superior a menos de 6.4 m de prof., o en la mitad de la pila.
18		12.60	C	Posible defecto localizado, en la mitad superior, a menos de 6.3 m de profundidad.

No. Pila	Registro Obtenido	Longitud Calculada (m)	Clasificación (Linkins, 2000)	Observaciones (según sección 2.3.3)
19		13.00	B	Defecto localizado en la mitad superior a menos de 6.5 m de prof., y/o mitad de la pila.

Las abreviaturas utilizadas para la tabla 3.3 son:

Δt – diferencial del tiempo de arribo entre la reflexión de la onda directa y la reflexión de la base de la pila.

x – distancia del geófono al punto de tiro.

d – distancia entre dos geófonos.

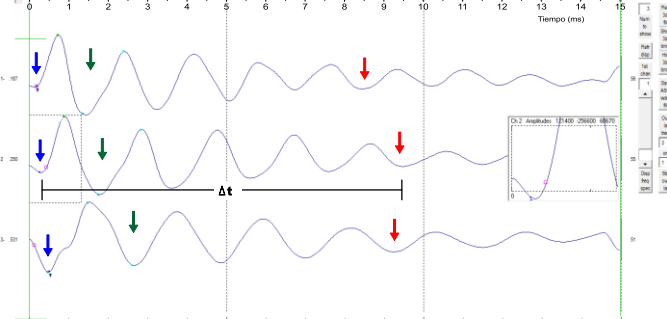
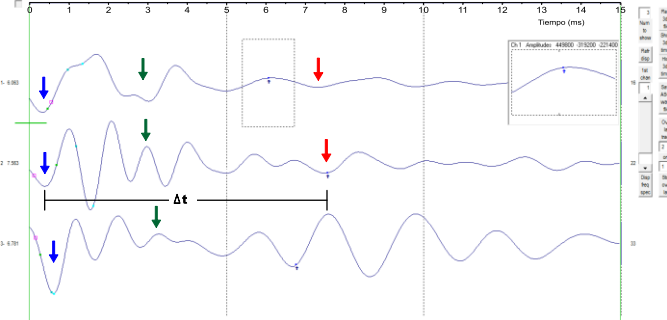
t_d – tiempo de retardo entre dos señales recibidas.

V_D – velocidad de la onda directa (ecuación 2.4.2).

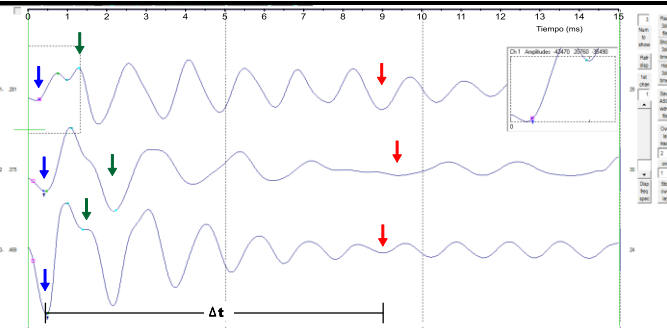
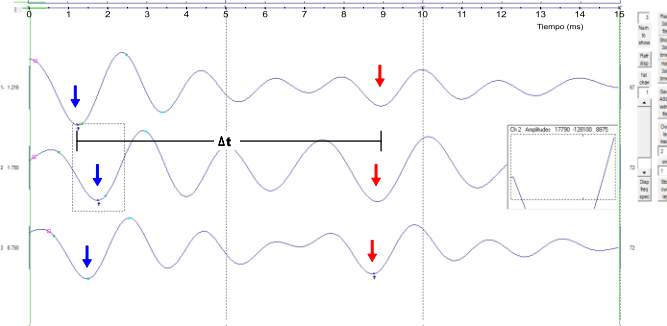
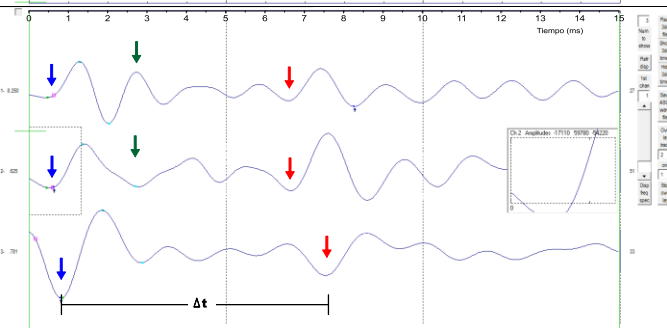
$V_P (V_D)$ – velocidad de la onda P, en función de la velocidad de la onda directa V_D (ecuación 2.4.3).

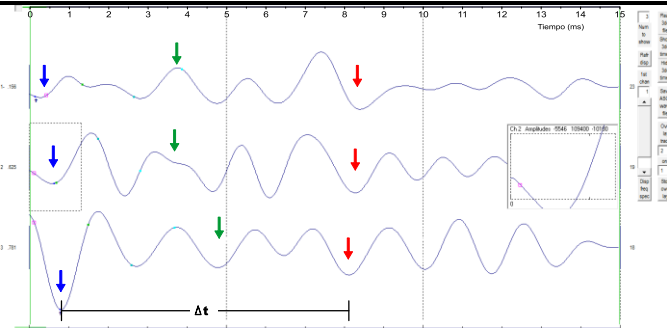
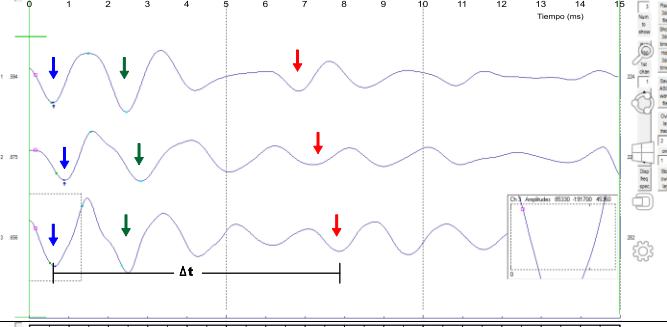
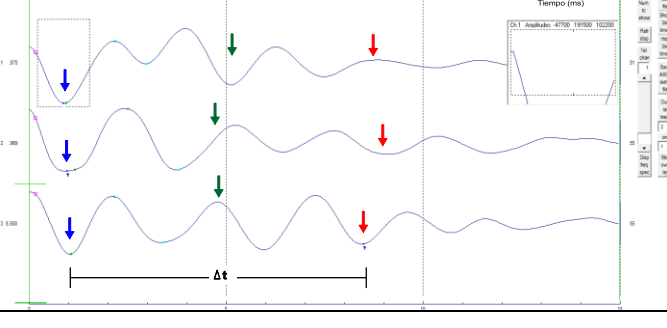
Prof. (V_D) – profundidad de desplante calculada a partir de la V_P , en función de la V_D (ecuación 2.4.1).

Tabla 3.3 Resultados del cálculo de velocidades y profundidad de la base de la pila, mediante la prueba de Sísmica de Reflexión.

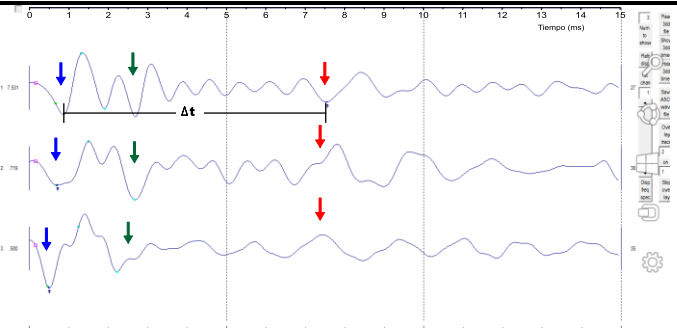
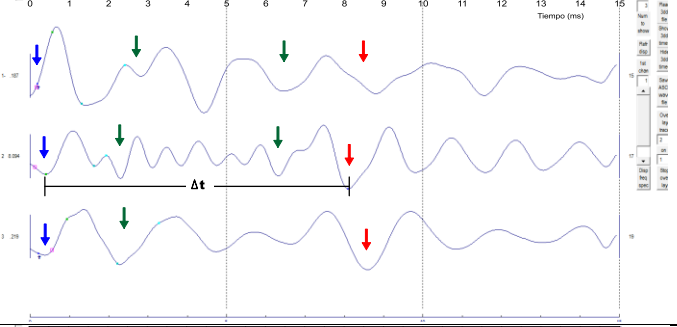
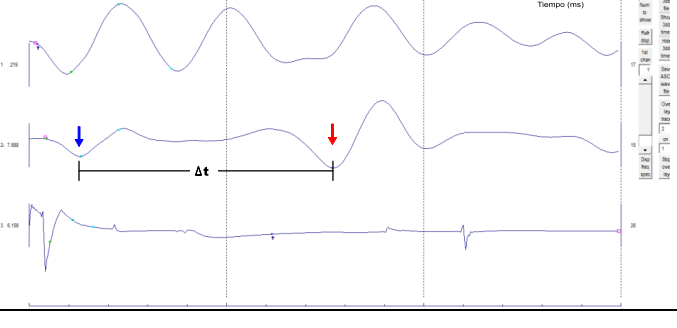
Pila	Registro Obtenido	Δt (s)	x (m)	td (s)	d (m)	V_D (m/s)	V_P (V_D) (m/s)	Prof. (V_D) (m)	Clasificación
1		9.241	0.5	0.165	0.3	1818.1	2659.1	12.3	B1
2		7.050	0.5	0.140	0.5	2142.8	3133.9	11.0	B2

Pila	Registro Obtenido	Δt (s)	x (m)	td (s)	d (m)	V_D (m/s)	V_P (V_D) (m/s)	Prof. (V_D) (m)	Clasificación
3		7.531	0.9	0.221	0.5	2262.4	3308.9	12.5	B1
4		8.438	0.5	0.140	0.3	2142.8	3133.9	13.2	A
5		8.200	0.5	0.125	0.3	2400.0	3510.0	14.4	B2

Pila	Registro Obtenido	Δt (s)	x (m)	td (s)	d (m)	V_D (m/s)	V_P (V_D) (m/s)	Prof. (V_D) (m)	Clasificación
6		8.131	0.5	0.135	0.3	2222.2	3250.0	13.2	B1
7		7.781	0.6	0.114	0.3	2631.5	3848.7	15.0	A
8		6.819	0.9	0.220	0.5	2272.7	3323.9	11.3	B1

Pila	Registro Obtenido	Δt (s)	x (m)	t_d (s)	d (m)	V_D (m/s)	$V_P (V_D)$ (m/s)	Prof. (V_D) (m)	Clasificación
9		7.375	0.9	0.171	0.4	2339.1	3421.1	12.6	C
10		7.219	0.9	0.234	0.5	2136.7	3125.0	11.3	C
11		7.455	0.9	0.180	0.4	2222.2	3250.0	12.1	B2

Pila	Registro Obtenido	Δt (s)	x (m)	t _d (s)	d (m)	V _D (m/s)	V _P (V _D) (m/s)	Prof. (V _D) (m)	Clasificación
12		7.001	0.9	0.219	0.5	2283.1	3340.0	11.7	B1
13		7.125	0.9	0.209	0.5	2392.3	3498.8	12.5	B2
14		7.094	0.9	0.206	0.5	2427.1	3549.8	12.6	D

Pila	Registro Obtenido	Δt (s)	x (m)	td (s)	d (m)	V_D (m/s)	V_P (V_D) (m/s)	Prof. (V_D) (m)	Clasificación
15		6.631	0.9	0.200	0.5	2500.0	3656.3	12.1	B2
16		7.494	0.9	0.220	0.5	2272.7	3323.9	12.5	B2
17		6.488	0.9	0.200	0.5	2500.0	3656.3	11.9	D

Pila	Registro Obtenido	Δt (s)	x (m)	td (s)	d (m)	V_D (m/s)	V_P (V_D) (m/s)	Prof. (V_D) (m)	Clasificación
18		6.700	0.9	0.250	0.5	2000.0	2925.0	9.8	D
19		7.510	0.9	0.210	0.5	2380.9	3482.2	13.1	C

Tabla 3.4 Integración de resultados de las pruebas de integridad realizadas.

No. Pila	Prof. de diseño (m)	Ultrasonido		PET (Pile Echo Test)		Sísmica de Reflexión			Observaciones
		V _U (m/s)	Prof. (m)	Prof. (m)	Clasif.	V _P (m/s)	Prof. (m)	Clasif.	
1	15.5	2700	12.5	12.6	C	2659.1	12.3	B1	Pila con mala Integridad
2	15.5	3100	10.9	11.2	C	3133.9	11.0	B2	Pila con mala Integridad
3	15.1	3350	12.6	13.0	B	3308.9	12.5	B1	Pila con mala Integridad d
4	15.5	3200	13.5	13.7	C	3133.9	13.2	A	Pila con incertidumbre en la integridad
5	15.4	3500	14.4	14.8	C	3510.0	14.4	B2	Pila con mala Integridad
6	15.5	3200	13.0	13.1	B	3250.0	13.2	B1	Pila con mala Integridad
7	15.2	3900	15.2	15.1	A	3848.7	15.0	A	Pila con una buena Integridad
8	13.3	3350	11.4	11.9	A	3323.9	11.3	B1	Pila con incertidumbre en la integridad
9	13.3	3500	12.9	12.6	C	3421.1	12.6	C	Pila con mala Integridad
10	13.3	3150	11.4	11.8	C	3125.0	11.3	C	Pila con mala Integridad
11	13.3	3350	12.5	13.2	B	3250.0	12.1	B2	Pila con mala Integridad
12	13.3	3400	11.9	12.3	A	3340.0	11.7	B1	Pila con incertidumbre en la integridad
13	13.3	3500	12.5	12.7	A	3498.8	12.5	B2	Pila con incertidumbre en la integridad
14	13.3	3650	12.9	13.1	A	3549.8	12.6	D	Pila con incertidumbre en la integridad
15	13.3	3700	12.3	13.3	B	3656.3	12.1	B2	Pila con mala Integridad
16	13.3	3450	12.9	12.4	B	3323.9	12.5	B2	Pila con mala Integridad
17	13.3	3450	11.2	12.7	B	3656.3	11.9	D	Pila con incertidumbre en la integridad
18	13.3	3450	11.6	12.6	C	2925.0	9.8	D	Pila con incertidumbre en la integridad
19	13.3	3550	13.3	13.0	B	3482.2	13.1	C	Pila con mala Integridad

3.3 Discusión de resultados

De los casos estudiados se observa que la prueba PET por si sola nos puede conducir a conclusiones incorrectas. Para el Sitio “B” algunas de las pilas no muestran reflexiones asociadas a defectos significativos, sin embargo cuando se analizan por sísmica de reflexión el resultado es opuesto.

Una de las causas a la que se le atribuye la inexactitud del PET, puede ser consecuencia de la insuficiente amplificación que se le aplica al reflectograma, lo cual reduce las reflexiones producidas por algún defecto y dificulta su identificación. Sin embargo, se debe tener sumo cuidado en su aplicación, pues también se amplificará el ruido de fondo.

En la mayoría de las pilas analizadas se comprueba que la velocidad promedio obtenida en la prueba de ultrasonido es mayor que la obtenida por los métodos de impacto sísmico, sin embargo esto no ocurre siempre debido a la variación de la velocidad a lo largo de la pila, ésta aumenta o disminuye en función de los defectos y la calidad del concreto, lo que implica que en algunos casos la velocidad por los métodos de impacto sea mayor que la velocidad obtenida por ultrasonido.

La profundidad de desplante de diseño debe ser considerada en el dictamen final de la pila, ya que a pesar de no presentar defectos observables en el registro o sismograma, sino se cumple con la con la profundidad de diseño, la capacidad de carga de la cimentación se verá afectada, por lo tanto la pila se debe considerar con mala integridad.

Del conjunto de pilas analizadas para el sitio “B”, solo una de las pilas (Pila 7), cumple con todas las características para ser considerada con una buena integridad. La clasificación final que se le asigna a cada pila es un tanto cualitativa, por lo tanto depende de la experiencia del intérprete.

Para los casos prácticos presentados, se observa que los resultados obtenidos por las técnicas empleadas son en su mayoría congruentes, por lo que es posible reducir la incertidumbre en los resultados, dando un mejor dictamen de las condiciones de las pilas ensayadas. La integración de los resultados y el dictamen final se muestra en el Anexo G.

Finalmente se documenta que las 19 pilas del Sitio “B” forman parte de una cimentación constituida por 49 pilas en las cuales se detectó un mal proceso constructivo. Del total de pilas analizadas sólo el 30% se encontraba en buen estado. Por lo que finalmente para la conclusión del proyecto se decide modificar la cimentación mediante una losa rígida con contratraveses invertidas, utilizando las pilas como inclusiones rígidas para disminuir el asentamiento del edificio.

CAPÍTULO 4. MAPAS DE RECURRENCIA EN LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS DE INTEGRIDAD EN PILAS

El análisis científico de datos a menudo requiere la extracción de conclusiones significativas sobre complejos sistemas que generan series de tiempo monitoreadas con un único sensor. Este problema es bastante complicado porque suele existir al mismo tiempo la abundancia y la falta de datos: un gran número de series de tiempo sobre un sólo parámetro registrado y poca información con respecto a otras variables importantes en la descripción del fenómeno.

La parte más difícil de este desafío de análisis surge cuando el sistema en estudio es de alta dimensión (no linealidad); por ejemplo el estudio de ondas sísmicas viajando a través de una pila de cimentación, registradas con un sensor en un punto del medio.

Si el sistema examinado es lineal, el análisis de datos es relativamente sencillo y las herramientas están bien desarrolladas. Se puede caracterizar a los datos mediante estadística (media, desviación estándar, etc.), ajuste de curvas (aproximación funcional) y uso de los varios tipos de gráficos para facilitar el entendimiento de su comportamiento. Si se requiere un análisis más detallado, normalmente se representa el sistema de la forma “entrada + función de transferencia → salida” usando cualquiera de los bien conocidos modelos en el tiempo o en el dominio de la frecuencia.

El reto son las manifestaciones sísmicas (geotécnicas y sismológicas), fenómenos que se pueden catalogar como no lineales con situaciones excepcionales de linealidad. En el análisis sísmico se requieren conclusiones precisas sobre dinámicas reconstruidas porque los sistemas plenamente observables son raros en la práctica y la mayoría de las variables de estado son físicamente inaccesibles o no se pueden medir con los sensores disponibles.

En este capítulo se presenta una introducción al procedimiento que usa conceptos de la teoría del caos en la caracterización global de las series de tiempo registradas en pilas a partir de imágenes en dos dimensiones llamadas Mapas de Recurrencia MR.

Una metodología que contenga los resultados de algunas de las pruebas de integridad en un marco teórico rígido como la Teoría del Caos, puede reducir la incertidumbre del método y ofrecer resultados eficientes durante el análisis de la velocidad de propagación de la onda de compresión. La metodología propuesta, utiliza las estructuras recurrentes de los sismogramas para una interpretación topológica de los datos. Se muestra el potencial de aplicación de estos razonamientos a través de los MR calculados de pilas de cimentación para distintas condiciones con/sin defecto. Se enlistan las características y atributos que pueden ser obtenidas con los MR.

4.1 Mapas de Recurrencia

Las herramientas de la dinámica no lineal que se usan para los análisis de Series de Tiempo (Kantz y Schreiber, 1997) se pueden clasificar en herramientas métricas, dinámicas y topológicas. La aproximación métrica depende del cómputo de distancias en el atractor del sistema. La aproximación dinámica tiene que ver con el cómputo de la divergencia de las orbitas cercanas a través de la estimación de los exponentes de Lyapunov. Los métodos topológicos se caracterizan por el estudio de la organización del atractor y estos métodos incluyen a los mapas de retornos cerrados y a los Mapas de Recurrencia MR (Eckmann *et al.*, 1986).

Los MR son representaciones complejas y visualmente atractivas. Son útiles en la búsqueda de correlaciones ocultas entre datos de alta complejidad. Para generar un MR de un conjunto de datos experimentales el primer paso es reconstruir la dinámica del sistema mediante la incorporación de la serie de tiempo unidimensional en un espacio de reconstrucción de d_E dimensiones utilizando el método de coordenadas retrasadas.

Dado un sistema cuya dimensión topológica es d , el muestreo de una única variable de estado es equivalente a la proyección de la dinámica del espacio de fase de dimensión d sobre un eje. Con una trayectoria en el espacio embebido se construye un MR calculando la distancia entre cada par de puntos (y_i, y_j) utilizando una norma apropiada y sombreando (coloreando) cada pixel (i, j) del mapa (o gráfico 2D) de acuerdo con esa distancia. Entonces, los datos experimentales o serie de tiempo y comportamiento deben estar dispuestos como:

$$Q_s = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (\text{Ecuación 4.1.1})$$

La reconstrucción de las coordenadas retrasadas de la dinámica en el espacio de fase de las observaciones x está regida por dos parámetros, dimensión embebida d_E y tiempo de retraso τ . La trayectoria resultante en R^{d_E} se expresa como:

$$\{y_1, y_2, \dots, y_m\} \quad (\text{Ecuación 4.1.2})$$

donde $m = N - (d_E - 1)\tau, y$

$$y_k = \{x_k, x_{k+\tau}, x_{k+2\tau} \dots x_{k+(d_E-1)\tau}\} \quad (\text{Ecuación 4.1.3})$$

Para $k = 1, 2, \dots, m$. Nótese que el uso de $d_E = 1$ simplemente regresa a la serie de tiempo original; una incorporación unidimensional es equivalente a no incorporar en lo absoluto. La correcta elección de d_E y τ es crítica para este tipo de reconstrucción de espacio de fase y debe entonces muy cuidadosamente, sólo valores correctos de estos dos parámetros responden al sustento teórico del Teorema de Takens (Takens, 1981; Packard *et al.*, 1980; Sauer *et al.*, 1991) y son topológicamente equivalentes a la dinámica original del espacio de fase.

Asumiendo que la incorporación de retraso de coordenadas se ha llevado a cabo correctamente, es natural suponer que el MR de una trayectoria reconstruida tiene gran parecido con un MR de la verdadera dinámica y las condiciones concluidas de la observación del mapa pueden ser tomadas como válidas y sólidamente soportadas desde el punto de vista de la dinámica no lineal.

Para la construcción de un MR debe considerarse que estos se basan en las distancias mutuas entre los puntos de una trayectoria, por lo que el primer paso en su construcción es elegir una norma D . En este trabajo se utiliza la norma máxima (Euclideana para una sola dimensión). Escogemos la norma máxima por dos razones: i) para facilitar la implementación y debido a que la distancia máxima que surge en los cálculos de recurrencia (la diferencia entre las mediciones mayor y menor en las series de tiempo) y ii) porque es independiente de la dimensión embebida d_E para esta norma particular.

Esto significa que podemos hacer comparaciones directas entre los MR generados usando diferentes valores de d_E sin necesidad de ajustar la escala de los mapas. La matriz de recurrencia A se define como:

$$A(i, j) = D(y_i, y_j), 1 \leq i, j \leq m \quad (\text{Ecuación 4.1.4})$$

donde

$$D(y_i, y_j) = \max_{1 \leq k \leq d_E} |x_{i+(k-1)\tau} - x_{j+(k-1)\tau}| \quad (\text{Ecuación 4.1.5})$$

Como ya se mencionó el propósito inicial de los MR es visualizar trayectorias en el espacio de fase, lo cual tiene una gran ventaja en el caso de sistemas de gran dimensión. Los MR dan una visión muy importante de la evolución en el tiempo de estas trayectorias, ya que las series de tiempo abarcan tanto las ordenadas y las abscisas y cada punto (i, j) en el plano está sombreado de acuerdo con la distancia entre los dos puntos correspondientes de trayectoria y_i y y_j (figura 4.1).

El píxel ubicado en (i, j) responde a un código de colores según la distancia. Detallar la matemática y las demostraciones de los postulados están fuera del alcance de este trabajo, se recomienda al lector interesado en el tema la revisión de Hinrichsen y Pritchard (2005).



Figura 4.1 Descripción gráfica del MR.

La figura 4.2 muestra MR generados a partir de conjuntos de datos muy diferentes: desde una serie de tiempo derivada por el muestreo de la función $\text{seno}(t)$ hasta la serie que representa el ruido blanco. El MR de la onda senoidal es relativamente fácil de entender, cada uno de los "bloques" de color representa la mitad de un periodo de la señal.

Los MR en el fondo de la figura 4.2, generados a partir de conjuntos de datos caóticos, son mucho más complicados. Ellos también tienen estructuras de bloques que semejan lo que se esperaría de una señal periódica pero esto en realidad no resulta de una periodicidad tan evidente.

En el caso de datos de origen caótico los elementos estructurales repetidos en el mapa requieren una explicación más profunda. Los puntos de recurrencia del ruido blanco no existen y despliegan simplemente manchas distribuidas en un patrón aleatorio homogéneo, lo que significa que la variable registrada carece de estructuras deterministas.

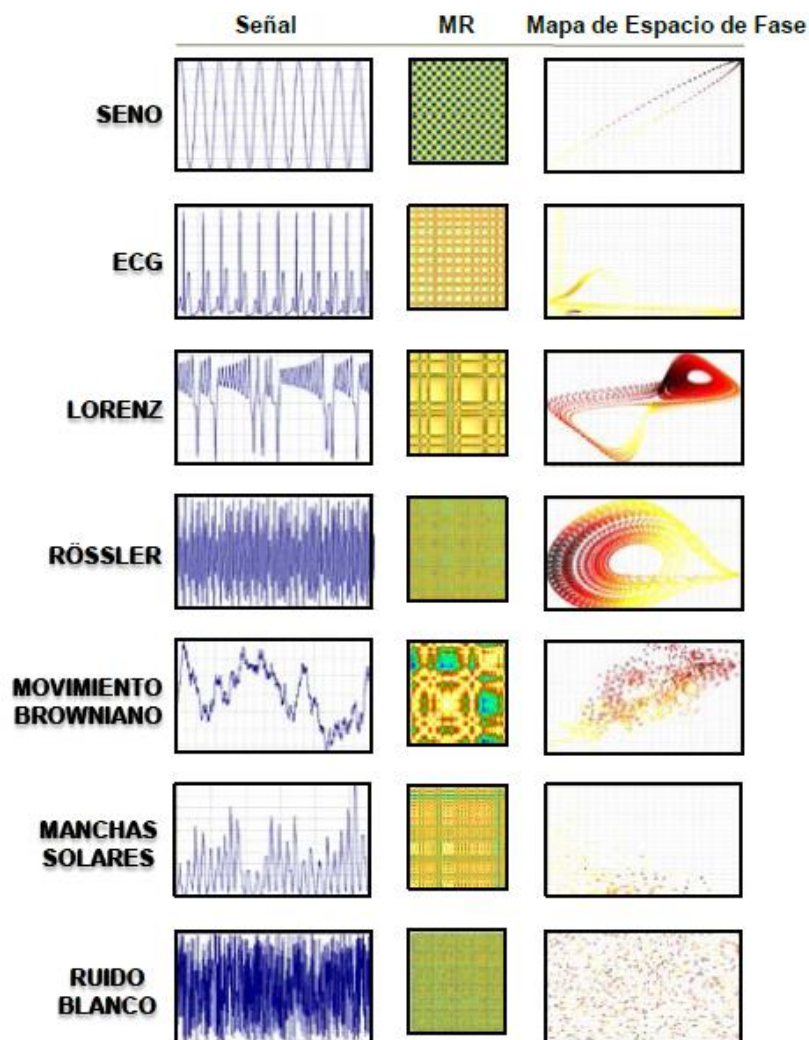


Figura 4.2 Ejemplos de MR calculados a partir de comportamientos conocidos.

4.2 Recurrencias e Integridad

En la detección de irregularidades en la integridad de la pila es fundamental la adecuada interpretación del comportamiento de la señal. Con la finalidad de asegurar la calificación precisa del cimiento, los registros de las pilas son normalmente clasificados en términos simples y sencillos (Raausche *et al.*, 1992), una de las más ampliamente usada y mejor aceptada por la comunidad ingenieril es:

- A-Pila Buena: No se aprecian defectos obvios, la respuesta de la punta de la pila es clara; se acepta para longitudes de pila de hasta 30 diámetros.
- B-Pila Mala: Los defectos en la pila son muy claros, no aparece el reflector de la punta de la pila después de eliminar el ruido de la señal. Para descartar una pila que genere este tipo de señales es recomendable llevar a cabo pruebas de detalle adicionales (pruebas de carga y/o sondeos de inspección), analizar profundamente el historial de construcción de la pila, y proponer una primera campaña de correcciones, en el caso de que los defectos se muestren superficialmente, para volver a efectuar los ensayos de integridad.
- C-Pila con posibles defectos. Los defectos en la pila no son claros. Es necesario llevar a cabo pruebas de integridad adicionales después de aplicar medidas correctivas en caso de que los defectos se localicen en la parte superior (gran longitud del armado que sobresale en el cabezal, imperfecciones del cabezal, deficiencia en el pulido de la superficie del cabezal en la zona donde se coloca el acelerómetro, etc.); y en caso que los posibles defectos persistan será necesario llevar a cabo pruebas de carga o sondeos directos (extracción de núcleos) para poder descartar dicha pila.
- D-Datos no concluyentes. Los registros son de baja calidad debido a: i) imperfecciones en el cabezal de la pila (armado que sobresale, superficies mal pulidas, contaminaciones en el cabezal), ii) alta resistencia del terreno localizado a lo largo de la pila, iii) longitud de la pila, iv) errores de ejecución y v) otras razones.

Sólo para las pilas clasificadas como “A” no es necesario llevar a cabo ensayos detallados, cualquier otro resultado podría requerir pruebas adicionales o de interpretación minuciosa.

Una calificación perfecta se alcanza en muy pocas ocasiones y generalmente el constructor se enfrenta a registros B, C o D, es rutinario usar al máximo las capacidades del personal involucrado en la interpretación de la prueba ya que una equivocación al respecto de la integridad impactará fuertemente en la economía de la obra.

A pesar de que existe normativa que describe los requerimientos mínimos para que una prueba se realice correctamente, se interprete de la mejor manera y se reporte consistentemente (ASTM-5882; Likins, *et al.*, 2007, entre otros) la decisión sobre la categoría del cimiento terminado es altamente subjetiva.

Es reconocido por la comunidad científica e ingenieril que la mayoría de los registros en campo no dibujan una respuesta clara y se alejan de los aspectos de la serie de tiempo que deben ser reconocidos para elaborar un dictamen sobre la situación de la pila (figura 4.3). Con la intención de minimizar esta peligrosa tendencia, se propone la interpretación de las series de tiempo con MR y la calificación de la integridad de la pila con base en las estructuras y recurrencias de la dinámica observada.

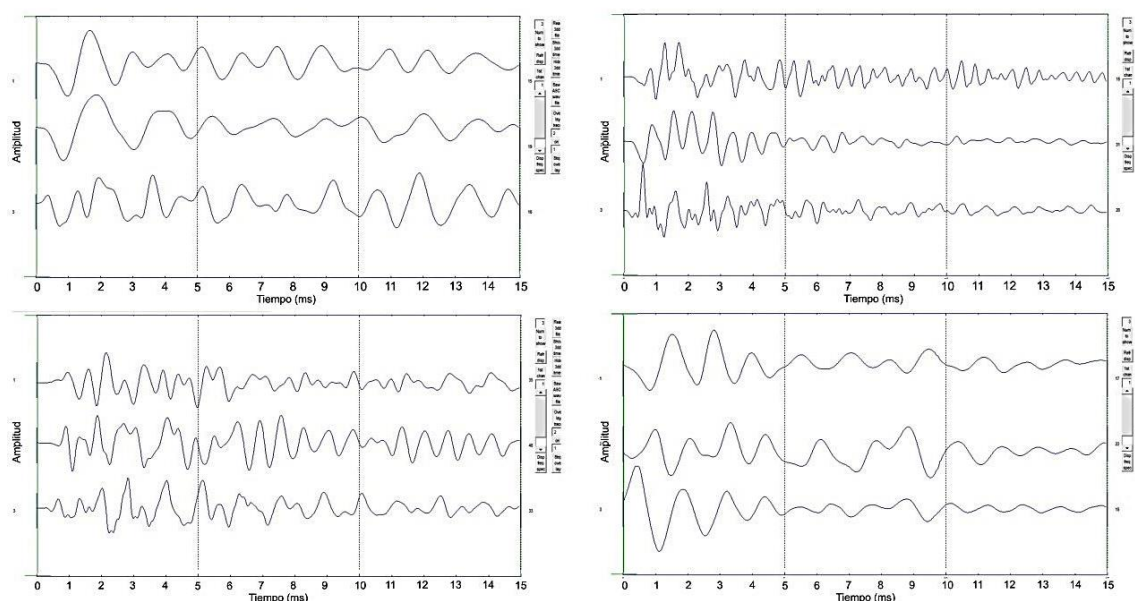


Figura 4.3 Respuestas registradas en pruebas ejecutadas en pilas, casos con alta controversia.

4.3 Lectura de Recurrencias

Los patrones en los MR están ligados a un comportamiento específico del sistema que genera la serie de datos. Siguiendo las características del espacio de fase, la trayectoria de la curva de dimensión de correlación y los patrones de gran escala en los MR (designados “topología”) las estructuras de MR pueden ser clasificadas como homogéneas, periódicas, desviadas e interrumpidas (Marwan, 2003):

- a) Los MR homogéneos son típicos de sistemas en los que los tiempos de relajación son cortos en comparación con el tiempo que generó el MR. Un ejemplo es la serie aleatoria estacionaria (véase el MR del ruido blanco - uniformemente distribuido- en la figura 4.2).
- b) Los sistemas periódicos y cuasi-periódicos tienen MR con diagonales bien orientadas y periódicas, o estructuras recurrentes cuasi-periódicas (diagonales cortadas o estructuras tablero de ajedrez). La figura 4.2 muestra los MR de la señal de seno, ejemplo de un sistema periódico. Relaciones irracionales de frecuencia causan estructuras recurrentes cuasi periódicas más complejas (ver los ejemplos de ECG, Lorenz, Rössler y manchas solares), sin embargo, aún para sistemas cuyas oscilaciones no son fácilmente reconocibles, los MR revelan claramente los patrones de recurrencia.
- c) Un desvío es causado por sistemas con parámetros de lenta variación, es decir, sistemas no estacionarios. El MR se desvanece a partir de la línea de identidad, LDI (LOI) (la diagonal principal en un MR, $R_{ij}=1$).
- d) Cambios abruptos en la dinámica (eventos extremos) causan áreas blancas y bandas frías, por ejemplo, las del movimiento browniano (figura 4.2). Este comportamiento permite la evaluación directa de la frecuencia de sus recurrencias.

La inspección más cercana de los MR revela la textura o estructuras de pequeña escala (Eckmann *et al.*, 1987). Estas estructuras pueden ser clasificadas en: puntos individuales, líneas diagonales, y líneas verticales/horizontales (la combinación de líneas verticales y horizontales forma agrupaciones rectangulares de puntos de recurrencia llamados clusters) (Marwan, 2003; Eckmann *et al.*, 1987).

Los MR de sistemas complejos aportan una introducción sistemática e instructiva en la dinámica y las trayectorias de comportamiento a través de la topología característica y la textura, pero la interpretación visual de los MR requiere de experiencia. Se recomienda al lector interesado en las explicaciones sobre topología y texturas (macro - micro escala) se recomienda la lectura de García *et al.* 2010.

Después de analizar un gran número de registros de pruebas y señales sintéticas en las que se conocen cabalmente las condiciones de las pilas (inspecciones adicionales, verificación del dictamen a posteriori, señales modificadas a modo) se está en condiciones de relacionar las recurrencias en los mapas con la situación física del cimiento en estudio. En la tabla 4.1 se muestran los MR calculados de estas series y se señalan las características en la dinámica de la respuesta que llevan a concluir sobre i) dimensiones de la pila, ii) defectos/anomalías, y iii) registros incompetentes.

La primera situación evidente es que las estructuras de los MR son excepcionalmente similares. Por la lectura de los mapas se puede decir que las pilas son consistentes en su respuesta, es decir son un mismo sistema generador. Las pilas son sistemas con una dinámica de dimensión alta, observe que los valores de d_E van de 15 a ~50 para pilas sanas o con defectos, respectivamente. Las pilas sanas o aquellas con algún tipo o grado de defecto, al ser afectadas por las vibraciones inducidas, evolucionan de una manera muy semejante, lo cual resulta lógico desde el punto de vista de la dinámica no-lineal.

En lo global los MR tienen combinaciones de tiras verticales y horizontales que marcan estados rectangulares (clusters) donde se podrían desarrollar i) en el primero, el arribo de la onda directa, situación de máximos valores en distancias (azules, fríos), ii) en el segundo, la reflexión por la base de la pila, situación de máximos valores en distancias (azules, fríos), y iii) en alguna parte del MR una banda o estructura de color en la zona media del espectro de colores (verdes) que significa reflexión por posible discontinuidad.

Debido a los cambios violentos entre el comienzo donde se encuentran las partes azules (fríos) y el resto del mapa hasta llegar al extremo del cimiento (segundo conjunto de estructuras frías), el comportamiento de una pila se puede definir como uno que se caracteriza por contener sub-eventos intensos (expresan alguna condición que evita el continuo) sostenidos durante ciertos Δx .

Las zonas de colores claros (cálidos) indican que en esos lapsos la respuesta se desvanece y/o pierde significado sobre la pila. El número de clusters que aparecen en el MR es la repetición o recurrencia de los sub-eventos) siendo claro que una pila sólo puede presentar tres de este tipo de situaciones: arribo de onda, reflexión por la base y posible discontinuidad.

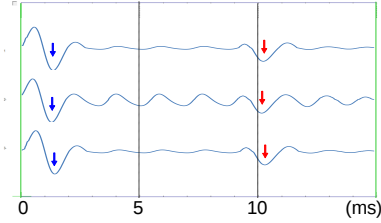
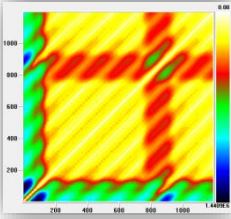
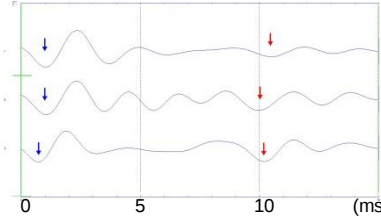
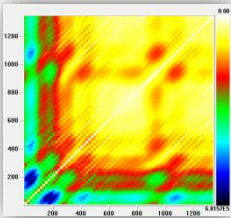
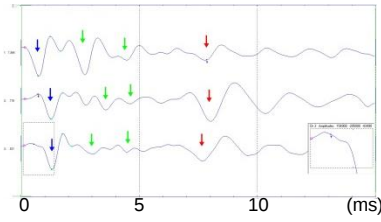
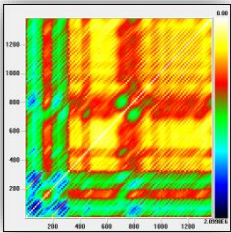
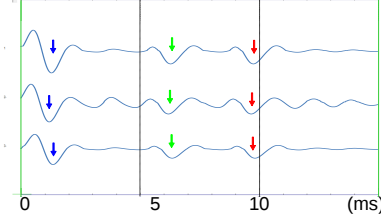
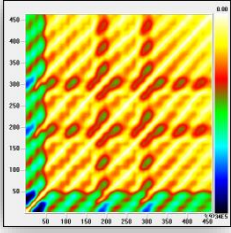
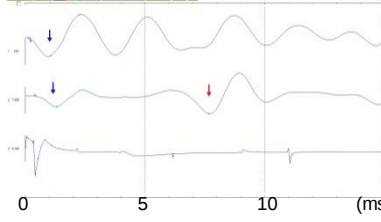
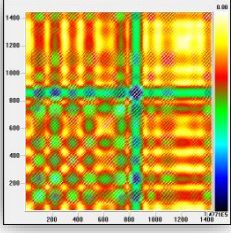
Ahora que se han calificado a las zonas verdes-azules como estructuras relacionadas con la calidad y geometría del cimiento, a través de las correspondencias entre registros, velocidades y longitudes se pueden definir con suficiente precisión cual es el tiempo en el sistema “capturado” por el sub-evento y esto como se relaciona con la pila.

Si se comparan los MR de series de tiempo de pilas con un MR de un péndulo oscilando podemos decir que el proceso que dirige la respuesta en los clusters fríos es complejo y debe ser etiquetado como “caótico”. Son estructuras de pequeña escala que pueden ser clasificadas como puntos individuales o líneas diagonales, el punto más extremo (azul marino, oscuro) indica el exacto punto de arribo de la onda, en el caso del primer cluster, mientras que en el segundo representa el extremo de la pila, si se calcula la distancia entre estos dos puntos (unidades L) se puede determinar la longitud de la pila.

La siguiente presencia de clusters indicaría algún tipo de defecto en la pila, y de la misma manera puede ubicarse el centro de la estructura (punto con el máximo en azul marino-oscuro o en verde) y con esto determinar la profundidad a la que se encuentra el defecto.

Si por el contrario los MR son homogéneos, no aparecen claramente los clusters de arribos, los tiempos de relajación (colores claros, cálidos) son cortos en comparación con el registro total de la prueba se trata de una serie aleatoria estacionaria que debe ser descartada. Este comportamiento puede deberse a contaminación de la prueba por ruido -uniformemente distribuido- que invalida los registros. Cualquier MR que presente las secuencias tipo tablero de ajedrez pertenecen a esta clase, llamada en esta investigación Datos no concluyentes o inconsistentes.

Tabla 4.1 Recurrencias en registros de reflexión sísmica, distintas calidades de pilas.

Señal	MR	Dimensión	Retraso	Clasificación
Señal Idealizada 		40	4	Pila Sana
Pila Caso "A" 		15	2	Pila Sana
Pila 13 – Sitio "B" 		32	2	Pila con defecto significativo en la mitad superior de la pila
Señal idealizada con defecto 		55	5	Pila con defecto localizado en la mitad inferior de la pila
Pila 17 – Sitio "B" 		3	1	Resultados Inconsistentes

Onda directa (↓), reflexión por posible discontinuidad (↓), reflexión por la base de la pila (↓).

En la figura 4.4 y 4.5 se muestran los MR calculados para una señal sintética y dos reales respectivamente, consideradas con una buena integridad, señalando las características en la dinámica de la respuesta que llevan a concluir sobre las condiciones de la pila. El número de clusters que aparecen en el MR de una pila sana, sólo puede presentar dos de este tipo de situaciones: arribo de onda y reflexión por la base.

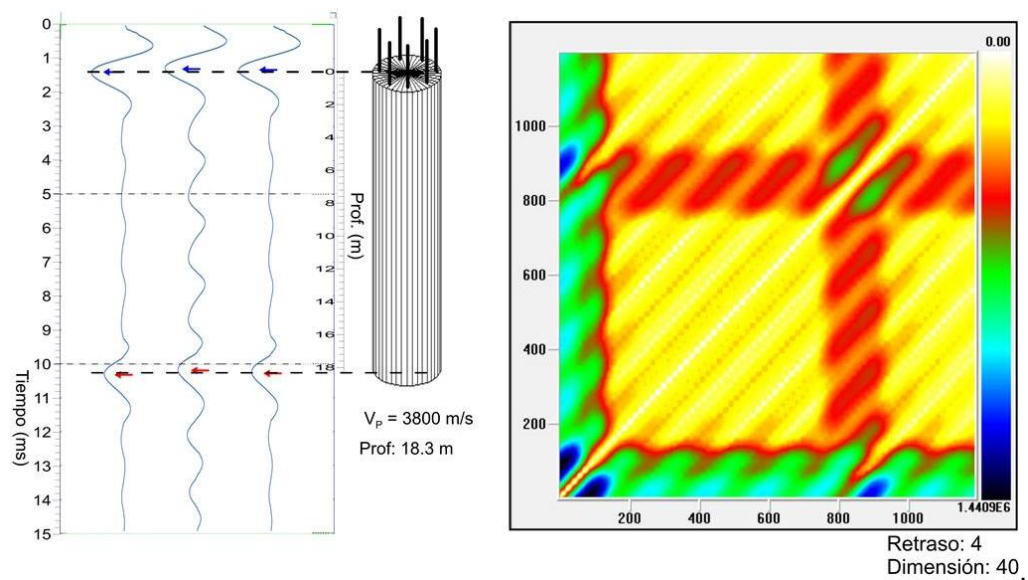


Figura 4.4. MR sintético para una pila sana.

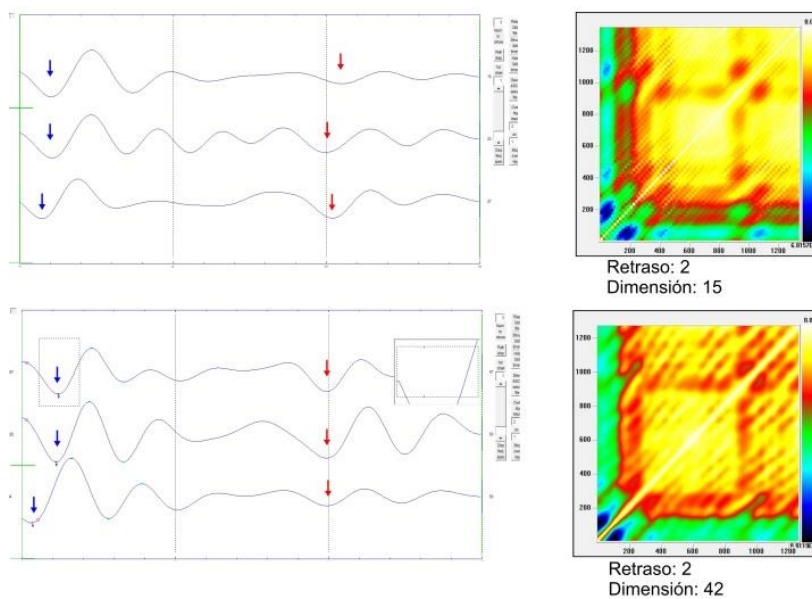


Figura 4.5 MR obtenidos de pruebas de impacto sísmico para una pila sana.

En la figura 4.6 se muestra dos ejercicios de aplicación. Los casos estudiados son: a) una pila de 0.60 m de diámetro y 14.2 m de longitud b) una pila de 1.0 m de diámetro y 12.7 m de longitud. Dado que su longitud es menor que 30 veces el diámetro, se cumple con la regla empírica sobre la aplicación del método y es de esperarse obtener sismogramas útiles.

En la figura se presentan los sismogramas obtenidos, así como su interpretación con MR. Debido a la calidad de las estructuras y la definición de clusters el sismograma puede ser usado para calificar la integridad de la pila. Se localizaron 3 clusters que indican sólo una anomalía que puede atribuirse a una imperfección.

Situando los centros de los clusters se determinaron i) la longitud de la pila (14.2 y 12.75 m respectivamente), ii) el sitio de posible defecto (~4 m y ~3 m respectivamente) y iii) calidad del concreto buena en el resto del cimiento. En este caso la calificación de la pila coincide con el reporte del constructor.

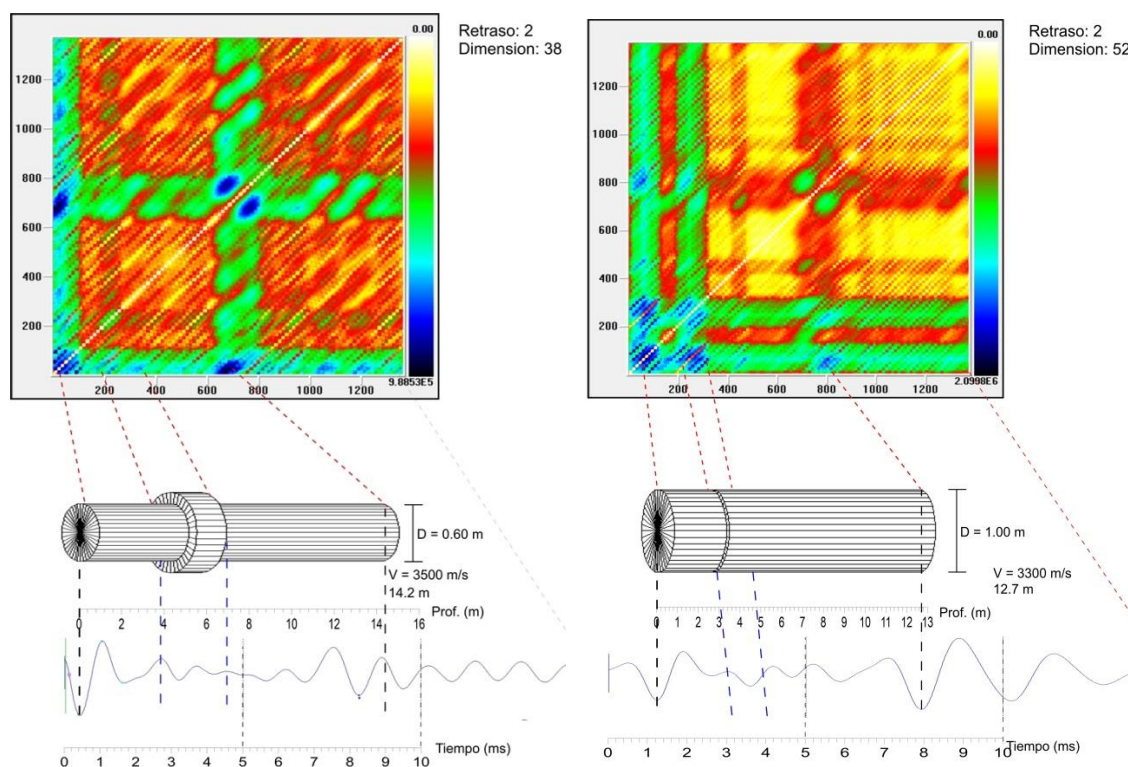


Figura 4.6 Ejemplo de lectura de recurrencia: pila con defecto cerca del cabezal.

Algunos ejemplos de registros de pruebas en donde la calificación del cimientó podría ser debatida dependiendo del analista, se presentan en la figura 4.7. Las señales, cuando se estudian bajo la mirada de las recurrencias, son claras expresando la situación física de la pila. Los MR calculados, aunque similares en la escala macro, cuando se ubican las estructuras cluster y el desvanecimiento de la señal, la dinámica de la respuesta emerge y permite concluir sobre las dimensiones de la pila y la ubicación de posibles defectos/anomalías.

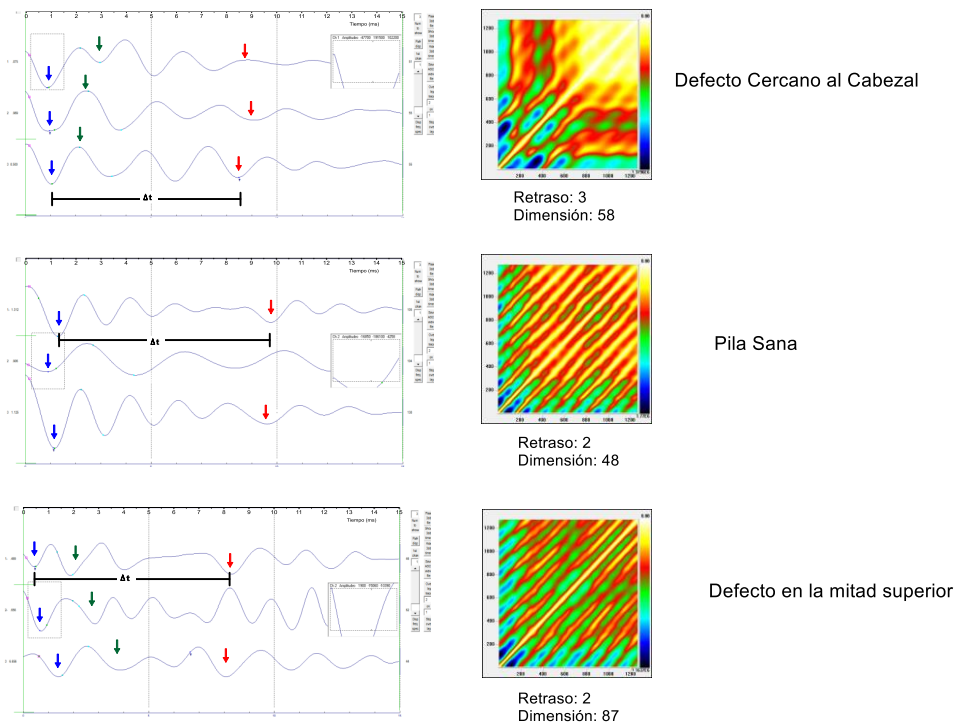


Figura 4.7 MR de señales en las que la interpretación convencional resulta ambigua.

CONCLUSIONES

En síntesis para la ejecución de una prueba de Integridad de Impacto Sísmico se deben tener las siguientes consideraciones, en ellas quedan implícitas las ventajas y limitaciones del método:

- Los ensayos no producen ninguna interferencia en la marcha de la obra, ya que se pueden ensayar grupos de pilas a medida que se van construyendo y descabezando.
- El implemento de tres geófonos facilita el procedimiento de instrumentación de la pila, además de reducir la incertidumbre y el ruido aleatorio en los resultados.
- Para que la prueba sea efectiva, el concreto en la parte superior de la pila debe estar limpio y libre de residuos, lechada y bentonita. Una prueba en condiciones inadecuadas puede producir resultados erróneos.
- El contenido de agua afecta a la propagación de la onda V_P , a mayor contenido de agua la velocidad V_P disminuye.
- La presencia de acero afecta fuertemente a la velocidad. La velocidad V_P en el acero es 1.4 – 1.7 veces mayor que en el concreto. La velocidad que se adquiere en las vecindades del acero es mayor que en el resto del concreto. Si se tiene un refuerzo de acero robusto no es posible obtener una medición correcta de la velocidad V_P .
- La prueba no produce ninguna información con respecto a la capacidad de carga de la pila, y sólo brinda información acerca de la calidad del concreto.
- Debido a que el receptor es colocado cerca del punto de impacto, los arribos registrados serán dominados por las deformaciones causadas por la onda P, además de asegurar la obtención de reflexiones.
- El uso de impactos de muy corta duración, genera un espectro de amplitudes muy complejo debido al fenómeno de dispersión generado por el agregado. Es por ello que en la práctica se recomienda el uso de un tiempo de contacto de mayor duración como lo son los martillos.
- El impacto de un martillo genera un pulso de bajas frecuencias lo que asegura que la longitud de la onda sea mayor que el tamaño de los agregados del concreto. Desafortunadamente, esto reduce la sensibilidad para detectar defectos pequeños.

- La determinación de la ubicación y el tamaño de los defectos están limitados por el contenido de frecuencias de las ondas de propagación. Ondas de baja frecuencia son necesarias para identificar la base de la pila. Y se necesitan frecuencias más altas para detectar defectos pequeños en el concreto.
- Las longitudes de onda tienen que ser más grande que el diámetro del eje para asegurar que la propagación de la onda sea esencialmente unidimensional y que el eje se comportará como una estructura en forma de varilla, en lugar de un medio elástico infinito.
- En el sistema de pulso simple (*Sonic Echo*) el tamaño del agregado en el concreto es despreciable debido al uso de bajas frecuencias (longitud de onda mayor a 1 m). Lo que no ocurre en la prueba de ultrasonido donde la velocidad si se ve afectada presentando mayor velocidad de propagación, a mayor contenido de agregado.
- Existe el tiempo suficiente entre la generación del pulso y la recepción de la onda reflejada (por la base inferior, una discontinuidad u otro defecto), para que el tiempo de llegada de la onda reflejada sea fácilmente determinado.
- Las reflexiones observadas no sólo provienen de defectos, sino que también son originadas por cualquier cambio en las propiedades elásticas del concreto.
- Cualquier defecto a lo largo de la pila se reflejara en los registros obtenidos, sin embargo, definir el tipo de defecto puede resultar demasiano complejo, lo que impide la distinción entre ciertos defectos como una cavidad y una grieta de secado.
- La amplitud de la reflexión es dependiente del contraste de impedancia entre el concreto de la base de la pila y el suelo-roca subyacente. Cuanto mayor sea la similitud entre estos materiales, menor será la amplitud de la onda reflejada.
- La onda que viaja a lo largo de la pila pierde energía con la profundidad como resultado de la fricción. En suelos con alta resistencia, así como en la roca, la reflexión de la base puede no ser visible. Esto puede suceder cuando la longitud excede de 20 a 40 diámetros, dependiendo de la cantidad de fricción.
- La onda reflejada se ve influenciada por los cambios tanto en la sección transversal y la fricción a lo largo del fuste. Estos dos factores pueden ser despreciables sólo si existe información fiable sobre el perfil del suelo y si la prueba es ejecutada a un número significativo de pilas, con la finalidad de despreciar las reflexiones originadas por cambios en la estratigrafía.

- Tener acceso a pruebas de compresión en núcleos extraídos de las pilas analizadas, permiten obtener de forma directa el módulo de Poisson y estimar con mayor precisión la velocidad de la onda P (V_P).
- La velocidad obtenida a partir de la prueba de impacto sísmico representa una velocidad promedio dentro de la pila, ya que la velocidad aumenta o disminuye conforme la impedancia y la propagación de la onda, definida por los defectos y la calidad del concreto.
- La velocidad obtenida en la prueba de ultrasonido no siempre será mayor a la velocidad obtenida por los métodos de impacto sísmico, debido a la variación de la velocidad a lo largo de la pila.
- La profundidad de desplante de diseño debe ser considerada en el dictamen final.

No se deben hacer estimaciones de la resistencia a la compresión a partir de la velocidad V_P , a menos que la correlación haya sido previamente establecida para el tipo de concreto a investigar. Sin embargo, de forma experimental, la velocidad obtenida mediante el método de ultrasonido para un concreto de buena calidad con resistencia de: 250kg/cm^2 (24.5 MPa) es de $\approx 4063\text{ m/s}$ y para uno de 200kg/cm^2 (19.61 MPa) es de $\approx 3915\text{ m/s}$. Si consideramos que las velocidades de onda determinadas por este método son aproximadamente 5 a 15% más altas que las determinadas por las pruebas de integridad, entonces podemos darnos una idea del rango de velocidad para un concreto de buena calidad en una prueba de impacto sísmico, teniendo que: Para concretos de 200 kg/cm^2 , su valor de velocidad puede ser aproximado a los 3500 m/s y para concretos de 250 kg/cm^2 , su valor de velocidad puede ser aproximado a los 3700 m/s .

De forma general para la interpretación del PET se tiene:

- Reducción: disminución de impedancia (menor resistencia a la propagación, mayor velocidad), pico arriba, onda reflejada como tensional.
- Ensanchamiento: aumento de impedancia (mayor resistencia a la propagación, menor velocidad), pico abajo, reflejada como compresiva.
- Tope de pilote: disminución de impedancia (mayor velocidad), pico arriba, onda reflejada como tensional.

- Estrangulamiento al medio: disminución de impedancia seguida de un aumento de impedancia.
- La prueba PET siempre debe ser verificada con alguna otra técnica.

Casos que más frecuentemente requieren una interpretación en la práctica geotécnica: Pila con reducción de impedancia, en donde se presenta una reflexión de la onda con un aumento de velocidad en dicho punto y la correspondiente reflexión en la punta. Un caso como este se presenta cuando existen problemas que no permiten la construcción del pilote con el diámetro de diseño y, en consecuencia, se evalúa de manera especial para determinar cómo pueden llegar a afectar la capacidad de soporte del elemento.

Sobre los RESULTADOS y su interpretación con MR:

- Se presentaron los aspectos de la ejecución de una prueba de integridad en pilas de cimentación coladas in situ y su interpretación desde la visión de la dinámica no lineal. Se describieron los criterios de lectura de un Mapa de Recurrencia para la clasificación cualitativa de la situación de las pilas de acuerdo con tres familias generales: Buena, con Defectos, y Datos inconsistentes.
- Se concluye que usar MR para interpretar los registros es particularmente ventajoso pues minimiza dictámenes ambiguos, se evalúan condiciones geométricas de manera directa y descarta inmediatamente las pruebas que no son viables y cuyos registros no deberían generar ningún tipo de conclusión al respecto de la integridad.
- Este tipo de verificaciones además de ser más sólidas, científicamente hablando, representan una opción viable para automatizar la ejecución→interpretación y valorar de manera oportuna y económica la calidad de estos importantes cimientos.
- Evaluar los MR de las pilas del sitio B con defectos resulta complicado ya que todas se muestran como pilas con diferente respuesta de MR a una pila sana, sin embargo definir el tipo de defecto aún se encuentra fuera de los límites de este trabajo, puesto que se necesita acceso a un número mayor de ensayos donde se tenga con certeza el tipo de defecto presente en cada pila.

Una siguiente etapa de investigación nos podría llevar a asociar el tamaño de los clusters con tipo y dimensión de daños, conceptos de pruebas equívocas, respuesta estructural y efectos de los depósitos de suelo, detallando el significado no sólo de la macro sino de la micro-escala (o textura en cada cluster) que puede tener significados más específicos sobre tipos de daños (sobre lo estructural), anomalías específicas (por el material) y efectos de sitio (por tipo de suelo). Esto es posible ya que las progresiones en los puntos individuales (clusters fríos) pueden ser categorizadas como oscilaciones cuasi-periódica a oscilaciones periódicas conforme la calidad de la pila supera ciertos umbrales.

REFERENCIAS

- Abramo, D. C. (2011). *Impact-echo modeling and imaging techniques. Civil Engineering Master's Theses*. Northeastern University, Department of Civil and Environmental. Boston: IRis.
- Achenbach, J. (1973). *Wave Propagation in Elastic Solids*. Amsterdam, London: North-Holland Publishing Co.
- ACSYS. (2006). *Ultrasonic tester UK1401*. Moscow: Acoustic Control Systems Ltd.
- Alves, A. (2010). *Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento y propiedades*. ATCP Engenharia Física, Brasil.
- ASTM C 1383. (2002). Standard Method for Measuring the P-Wave Speed and Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method, *Annual Book of ASTM Standards. 04.02*. West Conshohocken, PA: American Society For Testing And Materials.
- ASTM C 597-09. (2003). Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete. *Annual Book of ASTM Standards. 04.02*. West Conshohocken, PA: American Society For Testing And Materials.
- ASTM C469M. (2014). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *Annual Book of ASTM Standards. 04.02*. West Conshohocken, PA.: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 5882. (2002). Test Method for Low Strain Integrity Testing of Piles. *Annual Book of ASTM Standards. 04.08*. West Conshohocken, PA.: American Society For Testing And Materials.
- ASTM D 6760. (2008). Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing. *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken, PA.
- ASTM E 114. (2002). Practice for Ultrasonic Pulse - Echo Straight Beam Examination by the Contact Method. *Annual Book of ASTM Standards. Vol. 03. 03*. West Conshohocken, PA: American Society For Testing And Materials.
- Baker, C. N., Drumright, E. E., J. L., B., Mensah, F. D., & Parikh, G. (1993). *A Drilled Shafts for Bridge Foundation*. Publication No. FHWA-RD-92-004, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Berryman, J. (1991). *Nonlinear Inversion and Tomography: I. Borehole Seismic Tomography*. Livermore, CA.: Massachusetts Institute of Technology.
- Boashash, B. (2003). *Time-Frequency Signal Analysis and Processing*. London: Elsevier Science.

- Born, M., & Wolf, E. (1980). *Principle of Optics* (6th edition ed.). Oxford: Pergamon Press.
- Brenderberg, H. (1980). *Proc. of the Int. Seminar on the Application of Stress-Wave Theory on Piles*. Stockholm.
- Briaud, J., Ballouz, M., & Nasr, G. (2002). Defect and Length Predictions by NDT Methods for Nine Bored Piles. *Deep Foundations*, 173-194.
- BSI 1881. (1968). Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete. London: British Standards Institution.
- Buía, M., & Flores, P. (Invierno de 2008). Levantamientos sísmicos en círculos. (Schlumberger, Ed.) *Oilfield Review*, 20-35.
- Carino, N. J. (2004). Stress Wave Propagation Method. En V. M. Malhotra, & N. J. Carino. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Carino, N. J., Sansalone, M., & Hsu, N. N. (1986). Flaw Detection in Concrete by frequency Spectrum Analysis of Impact-Echo Waveform. *International Advances in Nondestructive Testing 12th ed.* (pág. 117). New York: Gordon & Breach Science.
- Chai, H. Y. (September de 2010). Effects of the Source on Wave Propagation in Pile Integrity. (ASCE, Ed.) *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 1200-1208.
- Cheng, C., & Sansalone, M. (1993). The impact-echo response of concrete plates containing delaminations. *Materials and Structures*, vol. 26(no. 1), 274-285.
- Chernauskas, L. R. (2005). *Manual for nondestructive testing and evaluation of drilled shafts*. Deep Foundation Institute.
- Chow, Y. K., & Phoon, K. K. (November de 2003). Low Strain Integrity Testing of Piles: Three-Dimensional. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1057-1062.
- Costain, J. K., & Coruh, C. (2004). *Basic Theory of Exploration Seismology* (Vol. 1 Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration). Oxford, U.K: Elsevier.
- Cummings, A. E. (1940). Dynamic Pile Driving Formulas. *Journal of the Boston*, vol. 23.
- Davis, A. G., & Chairman. (1998). Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. *American Concrete Institute*, ACI 228.2R-98.
- Davis, A. G., & Dunn, C. S. (1974). From theory to field experience with. *Proc. Inst. of Civil Engrs.*, 571-593.
- Dobrin, M., & Savit, C. (1998). *Introduction to Geophysical Prospecting* (4th ed.). Mc Graw Hill.
- Eckmann, J. P., Kamps, S. O., & Ruelle, D. (1987). Recurrence plots of dynamical systems. *Europhys Letts* 4, 973-977.
- Fernandez, C., & Téllez, E. (2000). Los ensayos de integridad estructural de pilotes. *Simposio de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica*. España.

- Fernández, J. M. (2010). *Controles y ensayos aplicados. Seminario 2010: Pilotes en edificación e infraestructura*. Buenos Aires: AIE.
- Figuerola, C. (1974). *Tratado de Geofísica aplicada*. LipoPrint.
- Finno, R. J., Gassman, S. L., & Osborn, P. W. (1997). *Non- Destructive Evaluation of a Deep Foundation Test Section at the Northwestern University National Geotechnical Experimentation Site*. Report Submitted to the Federal Highway Administration, Northwestern University, Evanston, Illinois.
- Forrest, J. (1977). *In-situ measuring techniques for pile lenght*. Naval Constr. Battalion Center, Civil Eng. Lab., Port Hueneme, CA.
- Frank, R., Ren Kung, S., & Likins, G. (1991). A Comparison of Pulse Echo and Transient Response Pile Integrity Test Method. *Transportation Research Bord Annual Meeting*. Washington, D.C.
- García, S. (2013). Characterization of ground motions using recurrence plots. *Geofísica Internacional*(52-3), 209-227.
- Gayá, M. (2004). *Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial en el Complejo Turbidítico de Ainsa (Huesca)*. Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica.
- Geospace Technologies. (2012). *GS-20DX Geophone*. Huston, Texas.
- Hearne, T. M., Stokoe, K. H., & Reese, L. C. (1981). Drilled-Shaft Integrity by Wave Propagation Method. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, vol. 107(no. 10), 1327-1344.
- Hertlein, B., & Davis, A. (2007). *Nondestructive Testing of Deep Foundations*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons.
- Higgs, J. S., & Robertson, S. A. (1979). Integrity testing of concrete piles by shock method. *Concrete*, 31-33.
- Hussein, M. H., & Goble, G. G. (2004). A brief history of the application of stress-wave theory to piles. *current Practices and Future Trends in Deep Foundation, Geotechnical Special Publication*(125).
- Isaacs, D. V. (1931). Reinforced Concrete Pile Formulae. *Transactions of the*, vol. XII(no. 370), 312-323.
- Jones, R. (1962). *Non-Destructive Testing of Concrete*. London: Cambridge University Press.
- Kansch, A., & Plutalow, A. (1936). On the Computation of Piles, Based on the Theory of Axial Impact. *Proceedings, First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Boston, Massachusetts: Harvard University.
- Kumar, P., & Monteiro, P. (2006). *Concrete Microstructure Properties and Materials* (3rd ed.). New York: Mc Graw Hill.
- Lai, J. R., Yu, C. P., & Liao, S. T. (2006). Assessment of the Integrity of Piles by Impedance Log Technique,. *Key Engineering Material*, 321-323, 340-343.

- Leslie, J., & Cheesman, W. (1949). An Ultrasonic Method of Studying Deterioration and Cracking in Concrete Estructures. *American Concrete Institute Journal*, vol. 21(no. 1), 17-36.
- Likins, G., & Rausche, F. (2000). Recent advances and proper use of PDI low strain pile integrity testing. *Sixth International Conference on the Application of Stress- Wave Theory to Piles*, 211-218.
- Malhotra, V., & Carino, N. (2004). *Nondestructive testing of concrete* (2nd ed.). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Naik, T., Malhotra, V. M., & Popovics, J. S. (2004). The Ultrasonic Pulse Velocity Method. En V. M. Malhotra, & N. J. Carino, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete* (págs. 8-1). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Nawy. (2008). *Concrete Construction Engineering Handbook* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Ni, S. H., & Huang, Y. H. (2012). Integrity Evaluation of PCC Piles Using the Surface. *Society for Experimental Mechanics, Experimental Techniques* (37), 63-73.
- Nozomu, Y. (2015). *Seismic Ground Response Analysis. Serie: Geotechnical, Geological and Earthquake*. (Vol. 36). London: Springer.
- Olson, L., & Church, E. (1986). Survey of Nondestructive Wave Propagation Testing Methods for the Construction Industry. *Proc. 37th Annual Highway Geology Symp.* Helena M.T.
- ONCCE NMX-C-275. (2004). *Determinación de la velocidad de pulso a través del concreto - Método de ultrasonido*. México.
- Paikowsky, S. (2015). (A. International, Productor) Obtenido de Stress Wave 2016 Welcome to the 10th International Conference on Stress Wave Theory and Testing of Deep Foundations: <http://sw2016.org>
- Paquet, J. (1968). Etude Vibratoire des pieux en béton: réponse harmonique. *Annls. Inst. Tech. Batim*(no. 245), 789-803.
- Phoon, Y. K., Wae, T. H., & Loi, C. S. (1999). Development os statistical quality assurance criterion for concrete using Ultrasonic Pulse Velocity Method. *ACI Mater J.*, 96(5), 568.
- Pile Test. (2008). *PET Pile Echo Tester Advanced, Friendly, Robust Product Data sheet*. United Kingdom.
- PileTest. (2014). Pile Wave - Simulation of wave propagation in a pile.
- Popovics, J., & Cano, M. (September, 2007). *Effect of excitation pulse duration*. Documentation for general BibTeX users.
- Popovics, S., Rose, J. L., & Popovics, J. S. (1990). The behavior of ultrasonic pulses in concrete. *Cement and Concrete Research*, 20, 259.
- Pratt, D., & Sansalone, M. (1992). Impact-Echo Signal Interpretation Using Artificial Inteligence. *ACI Mater J.*, vol. 8(num. 2), 178.

- Rausche, F. (1970). *Soil Response from Dynamic Analysis and Measurements on Piles*. Ph.D. thesis, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio.
- RILEM NDT1. (1972). *Testing of concrete by the ultrasonic pulse method*. Paris: RILEM Recommendations.
- Rodríguez, J., & Restrepo, V. (2006). Análisis espectral de propagación de ondas para análisis de pruebas de integridad de pilotes. *Ingeniería y Universidad*, 10(2).
- Samman, M. M., & O'Neil, M. W. (1997). The Reliability of Sonic Testing of Drilled Shafts. *Concrete Internacional ASCE*, vol. 19(no. 1), 49-54.
- Sansalone, M., & Carino, N. J. (1986). *Impact Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transients Stress Wave*. National Bureau of Standards.
- Sansalone, M., & Streett, W. (1997). *Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Ma-*. Ithaca, N.Y.: Bullbrier Press.
- Santos, J. A. (2008). Technology and Practice: Proceedings of the 8th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. Lisboa: IOS Press BV.
- Sato, H., Fehler, M., & Maeda, T. (2012). *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth*. New York: Springer.
- Sercel Inc. (2015). *Geófonos Especificaciones*. Houston, Texas.
- Sheriff, R. E., & Geldart, L. P. (2002). *Exploración Sismológica Volumen II: Procesamiento e Interpretación de Datos*. Limusa.
- Smith, A. E. (August de 1960). Pile Driving Analysis by the Wave Equation. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol. 86(no. SM4).
- Smith, I. M., & Chow, Y. K. (1982). Three dimensional analysis of pile drivability. *Proc. 2nd Int. conf. on Numerical Method in Offshore Piling*, 1-20.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Turner, M. J. (1997). *California (Baker, Drumright, J. L., Mensah, & Parikh, 1993)*. London: Construction Industry Research and Information Association.
- Whitehurst, E. A. (1967). Evaluation of concrete Propierties from Sonic Test. *American Concrete Institute Monograph*, 94.
- Yilmaz, O. (2008). *Seismica Data Analysis*. (Vol. 1). Tulsa, O.K.: Society of Exploration Geophysicists.

ANEXOS

A. Teoría de Elasticidad y Ley de Hooke

Si una fuerza F actúa sobre un área S , definimos al esfuerzo σ por la relación:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

El esfuerzo σ , puede ser de tensión o compresión, según esté dirigido hacia afuera o hacia el área. Si la fuerza se dirige paralelamente al área, se llama esfuerzo cortante

El coeficiente de alargamiento ε_l es la relación entre el alargamiento (o acortamiento) Δl producido por un esfuerzo y la longitud inicial l : $\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$

Análogamente, el coeficiente de deformación transversal ε_d es: $\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d}$

Se define como deformación de cizallamiento o corte (Φ) al ángulo de deformación producida por un esfuerzo cortante.

Módulo Young (E): Esfuerzo de tensión o compresión y una deformación lineal. Si actuamos sobre una barra con una fuerza F paralela al eje de la barra sobre una superficie S .

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_l}$$

Coeficiente de Poisson (ν): Deformación volumétrica. Si consideramos la fuerza F del caso anterior, además del cambio de longitud se producirá un cambio en el diámetro.

$$\nu = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_d}$$

Módulo de Rigidez (G): Cambio de forma sin cambio de volumen. Si consideramos una fuerza F actuando paralela al área S .

$$G = \frac{\sigma}{\Phi} = \frac{E}{2(1 + \nu)} \approx \frac{2}{5}E$$

Módulo de Compresibilidad (k): Cambio de volumen V sin cambio de forma. Si un cuerpo está sometido a un esfuerzo de compresión en todas sus direcciones (Presión P).

$$k = \frac{P}{\frac{\Delta V}{V}}$$

$$k = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

El coeficiente de Lamé λ relaciona el módulo de Young con la relación de Poisson:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

B. Teoría de Propagación de Ondas

La ecuación diferencial de propagación de ondas planas en una dirección en función del Módulo de Young está definida por:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

La ecuación de onda en tres direcciones para deformación compresional es:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{\rho}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad \theta - \text{Dilatación}$$

Análogamente para deformación de corte:

$$\frac{\partial^2 \alpha}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \alpha}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \alpha}{\partial z^2} = \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 \alpha}{\partial t^2} \quad \alpha - \text{Deformación de corte}$$

Resolviendo para un sólido elástico infinito tenemos que la V_{pp} y V_s (velocidad de fase de compresión y de corte respectivamente) están en función del Módulo de Young (E), la densidad (ρ) y la relación de Poisson (ν):

$$V_{pp} = \sqrt{\frac{\lambda - 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 - 2\nu)(1 + \nu)}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}}$$

La relación entre la V_{pp} y V_s está definida como:

$$\frac{V_{pp}}{V_s} = \sqrt{\frac{k}{G} + \frac{4}{3}} = \sqrt{\frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu}}$$

Para sólidos finitos, como losas delgadas o largas estructuras. La velocidad V_{pp} puede variar dependiendo de sus dimensiones laterales y la longitud de onda de la propagación. Para esbeltas y largas estructuras (como las pilas) la velocidad de propagación es independiente de la relación de Poisson si el diámetro de la barra es

mucho menor que la longitud de onda. Para este caso la V_{pp} es llamada velocidad de onda P de barra (V_p) (Finno, Gassman, & Osborn, 1997) y está dada por la ecuación:

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

Para largas y esbeltas estructuras con una relación de Poisson de 0.2 típica del concreto, la V_p es 5% a 15% menor que la V_{pp} en un sólido infinito (Finno, Gassman, & Osborn, 1997).

Una función de onda más real y completa dada por un pulso de cualquier tipo, es la Serie de Fourier:

$$f(Vt - x) = \sum_{n=1}^{n=\infty} [An \cos nk_i(VT - x) + Bn \operatorname{sen} nk_i(Vt - x)]$$

$$f(Vt - x) = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[An \cos 2\pi n \left(\frac{1}{T_1} - \frac{x}{\lambda_1} \right) + Bn \operatorname{sen} 2\pi n \left(\frac{1}{T_1} - \frac{x}{\lambda_1} \right) \right]$$

$$V = \lambda f$$

$$f = \frac{1}{T}$$

$$V = \frac{\lambda}{T}$$

Siendo: λ la longitud de onda, f la frecuencia y T el periodo.

C. Impedancia y coeficientes de reflexión – refracción

La impedancia acústica (Z) es una propiedad de estado intensiva. Es la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre este, es decir una forma de disipación de energía de las ondas que se desplazan en un medio. La impedancia Z relaciona la densidad ρ con la velocidad del medio c :

$$Z = \rho c$$

Ahora bien, si tomamos en cuenta que el área de sección correspondiente, es un cuerpo aislado de dimensiones finitas, considerando el área (S), el Módulo de Young (E) y la velocidad del medio c , la impedancia mecánica se define como la medida de la oposición al movimiento de una estructura sujeta a una fuerza y se expresa como:

$$Z = \frac{SE}{c}$$

Otra expresión alterna para la impedancia (derivada de la combinación de las ecuaciones de esfuerzo, deformación y módulo de Young) para una barra, se define como el ratio entre la fuerza aplicada F y la velocidad V instantánea de la partícula producida.

A partir de las ecuaciones del anexo A tenemos que:

$$F = S\sigma = S(E\varepsilon) = SE \frac{\partial u}{\partial x}$$

El cambio de separación entre dos posiciones adyacentes, ∂u esta caracterizado por la velocidad instantánea de la partícula, $V = \partial u / \partial t$, mientras que la cantidad u define la velocidad que tarda la onda en pasar por dos puntos adyacentes:

$$\partial u = V \partial t$$

$$u = c \partial t$$

Sustituyendo tenemos:

$$F = SE \frac{V}{c} Z V$$

Visto de esta manera, la impedancia representa la resistencia que ofrece la barra (o pilote) a cambiar de velocidad, expresándose finalmente la impedancia como:

$$Z = \frac{F}{V}$$

A partir de la expresión de la impedancia se calculan los coeficientes de transmisión y reflexión. Definiendo a Z_1 como la impedancia para la onda incidente que coincidirá con la onda reflejada, y Z_2 como la impedancia para la onda refractada o transmitida. Los coeficientes de reflexión y transmisión se expresan como:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad ; \quad T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Se observa que $R + T = 1$, es decir, que el porcentaje de energía reflejada más el porcentaje de energía transmitida al segundo medio provenientes de la energía incidente es igual a la unidad.

De las ecuaciones anteriores se deduce que el aumento de impedancia, produce mayor reflectividad, es decir, en cuanto más brusco sea el cambio en la discontinuidad, mayor será el coeficiente de reflexión, y mayor porcentaje de la energía incidente será reflejada en la discontinuidad, por lo tanto, se tendrá un menor porcentaje de energía transmitida al medio inferior. E inversamente la disminución de la impedancia, produce menos reflectividad y se tendrá mayor porcentaje de la energía transmitida al medio inferior.

Valores altos de R implican la posibilidad de observar con más facilidad la onda reflejada en los registros, sin embargo, la penetración de la onda disminuirá y las reflexiones producidas en contrastes posteriores serán de menor amplitud, debido a que el porcentaje de energía refractada es menor. La energía reflejada también se ve afectada por el espesor y la rugosidad de la discontinuidad o del objeto atravesado.

Ahora, si los coeficientes de reflexión y transmisión se describen con amplitudes en lugar de energía, quedan representados por r y t , respectivamente, como:

$$r = \frac{A_r}{A_i} \quad ; \quad t = \frac{A_t}{A_i}$$

Donde, A_i es la amplitud de la onda incidente en la discontinuidad, A_r la amplitud de la onda reflejada y A_t la amplitud de la onda transmitida o refractada.

Los coeficientes de reflexión y transmisión con amplitudes están relacionados con los coeficientes de reflexión y transmisión con energía, de la siguiente manera:

$$R = r^2 \quad ; \quad T = t^2$$

D. Cálculo de la profundidad del reflector

Caso de velocidad constante y reflector horizontal.

En este caso los rayos sísmicos son líneas rectas, y los frentes de onda, superficies esféricas, es decir, circunferencias en la sección vertical que consideramos.

Partiendo de la ecuación general de velocidad:

$$V = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$

Sea P el punto de impacto, G un geófono situado a la distancia x , t el tiempo registrado y r la capa reflectora horizontal, como se muestra en la figura. Para el caso de una onda reflejada la distancia recorrida será PAG , por lo tanto:

$$PAG = 2PA = 2\sqrt{\frac{x^2}{4} + h^2} = \sqrt{x^2 + 4h^2}$$

$$\text{Si, } t = \frac{2PA}{V}$$

Sustituyendo, tendremos que el tiempo registrado queda definido como:

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + 4h^2}}{V}$$

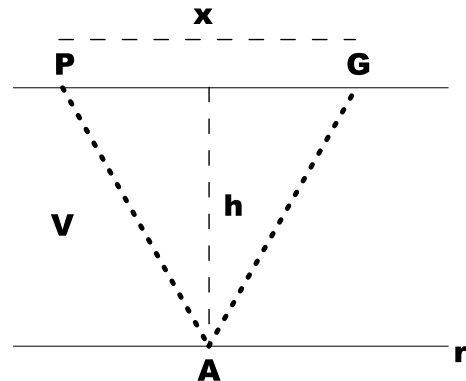
De donde:

$$h = \frac{1}{2}\sqrt{V^2t^2 - x^2}$$

Si conocemos V , x y t el problema está resuelto.

En la prospección para la inspección de pilas la distancia $x \rightarrow 0$, por lo que para fines prácticos puede ser despreciable, resultando la ecuación simplificada que se emplea en la mayoría de la literatura:

$$h = \frac{Vt}{2}$$



E. Duración de Pulso (“tiempo de contacto”)

El ancho de banda, B (Hz), se define como el inverso de la duración del pulso o tiempo de contacto, W (s). El pulso que se emite debe tener una duración muy corta, por lo tanto, la anchura de banda tiene que ser muy grande. Para razones prácticas W es aproximadamente igual a la frecuencia central f_c y se encuentra equidistante alrededor de ella.

$$W = \frac{1}{B} \approx \frac{1}{f_c}$$

La sensibilidad para distinguir un objeto por una onda, está determinada por el ancho de banda B y la duración del pulso W . La longitud del pulso equivalente en metros, es el producto de la duración del pulso y la velocidad de la onda en el medio por el que se propaga. Esta longitud equivalente determina el tamaño mínimo para que un objeto sea observado.

$$\Delta x = \frac{Wv}{2} = \frac{v}{2f_c}$$

El factor de un medio corresponde al tiempo doble de propagación para el caso de ondas reflejadas.

Por lo tanto, a mayor frecuencia (señales con mayor ancho de banda), menor duración del pulso (“tiempo de contacto”), menor longitud de pulso y objetos más pequeños observados.

F. Sondeos Exploratorios

Para definir la continuidad y calidad de las pilas, se efectuaron 7 sondeos de avance controlado con barril y recuperación de muestras, correspondientes a las pilas 1 a 7 del sitio "B", los cuales se correlacionan con las pruebas de integridad para dar una mejor interpretación.

Con base en la información de los sondeos realizados, a modo de ejemplo se muestran 3 de los 7 sondeos, medidos a partir del piso existente.

PILA 1

De 0.00 a 15.40 m - Concreto con varilla

De 15.40 a 16.40 m - Limo arenoso con gravas

El desplante de la pila se encuentra a 15.40 m

SONDEO: PILA 2		PERFORADORA: ACKER				BOMBA: MOYNO 3L6				
Muestra No.	De	A	Long. de avance (m)	Recup. (m)	No. De golpes				Σ	Descripción del material
					15cm	15cm	15cm	15cm		
1	0.00	0.60	0.60	0.48						Núcleo de Barril
2	0.60	1.40	0.80	0.75						Núcleo de Barril
3	1.40	2.70	1.30	0.85						Núcleo de Barril
4	2.70	4.90	2.20	2.20						Núcleo de Barril
5	4.90	7.10	2.20	2.15						Núcleo de Barril
6	7.10	8.55	1.45	1.05						Núcleo de Barril
7	8.55	10.50	1.95	1.80						Núcleo de Barril
8	10.50	10.60	0.10	0.10						Núcleo de Barril
9	10.60	10.90	0.30	0.30						Núcleo de Barril
10	10.90	12.10	1.20	1.10						Núcleo de Barril
12	12.10	13.70	1.60	0.25						Núcleo de Barril
13	13.70	15.40	1.70	0.20						Núcleo de Barril
14	15.40	16.50	1.10	0.65						Limo arenoso con grava

PILA 2

De 0.00 a 13.35 m - Concreto con varilla

De 13.35 a 14.85 m - Discontinuidad

De 14.85 a 16.65 m - Limo arenoso con gravas

De 16.65 a 7.40 m - Arena fina

SONDEO: PILA 2		PERFORADORA: ACKER				BOMBA: MOYNO 3L6				
Muestra No.	De	A	Long. de avance (m)	Recup. (m)	No. De golpes				Σ	Descripción del material
					15cm	15cm	15cm	15cm		
1	0.00	1.13	1.13	0.73						Núcleo de Barril
2	1.13	2.00	0.87	0.71						Núcleo de Barril
3	2.00	4.15	2.15	0.96						Núcleo de Barril
S/R	4.15	4.75	0.60	S/R						S/R
4	4.75	6.75	2.00	2.00						Núcleo de Barril
5	6.75	8.95	2.20	2.05						Núcleo de Barril
6	8.95	11.15	2.20	0.72						Núcleo de Barril
7	11.15	13.35	2.20	0.83						Núcleo de Barril
S/R	13.35	14.25	0.90	S/R						S/R
S/R	14.25	14.85	0.60	S/R	P/H	P/H	P/H	P/H		S/R
8	14.85	15.45	0.60	0.35	10	16	35	43	51	Limo arenoso
9	15.45	16.05	0.60	0.09	33	18	27	50/15	45	Limo arenoso
S/R	16.05	16.20	0.15	S/R	50/15					S/R
ABT	16.20	16.65	0.45	ABT						
10	16.65	17.25	0.60	0.34	27	31	34	40	65	Arena fina
11	17.25	17.40	0.15	0.10	50/15					Arena fina

PILA 7

De 0.00 a 0.53 - Cajón

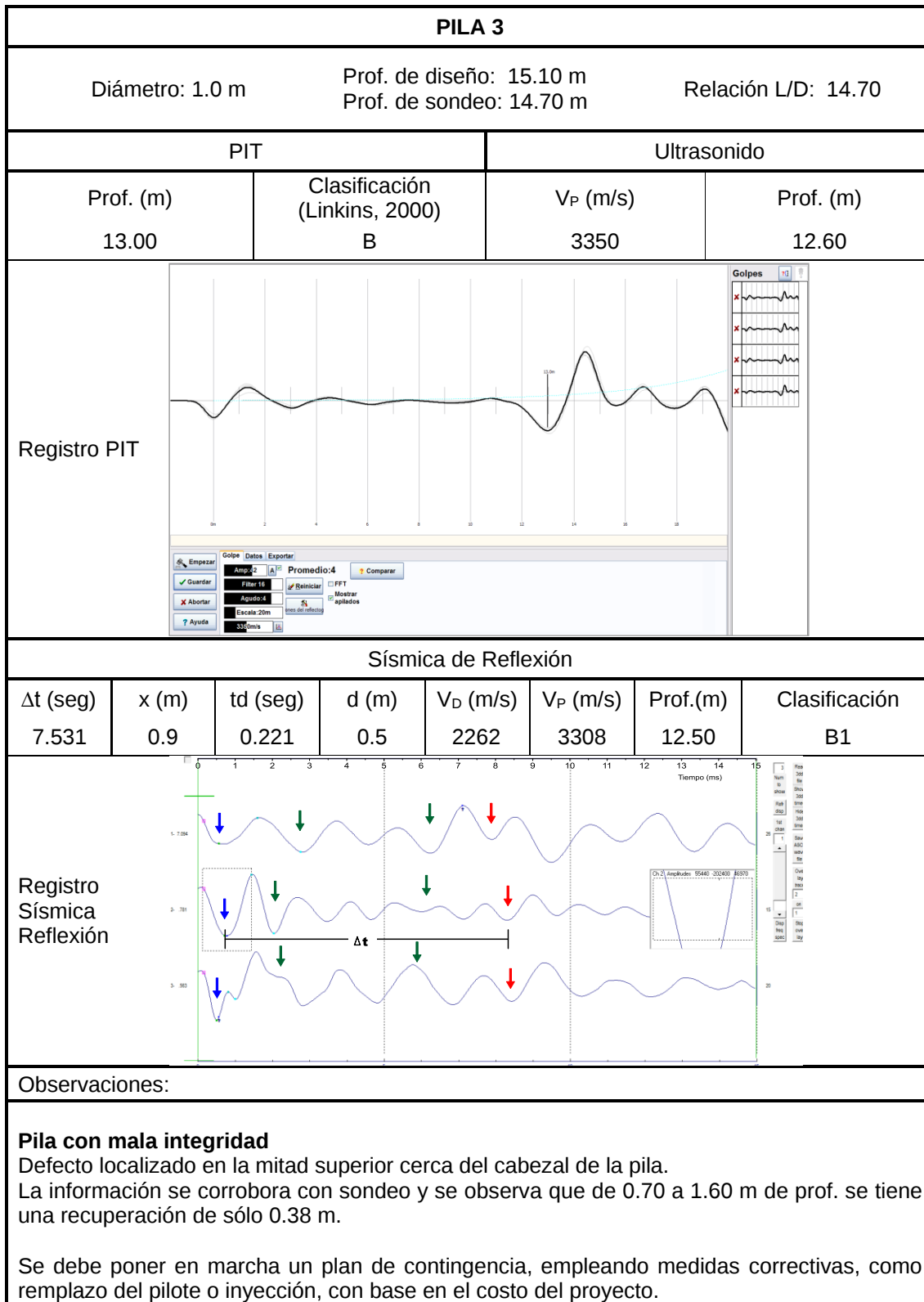
De 0.30 a 15.15 - Concreto con varilla

SONDEO: PILA 7		PERFORADORA: ACKER				BOMBA: MOYNO 3L6				
Muestra No.	De	A	Long. de avance (m)	Recup. (m)	No. De golpes				Σ	Descripción del material
					15cm	15cm	15cm	15cm		
ABT	0.00	0.53	cajón							Núcleo de Barril
1	0.53	1.33	0.80	0.80						Núcleo de Barril
2	1.33	1.97	0.64	0.64						Núcleo de Barril
3	1.97	3.95	1.98	1.98						Núcleo de Barril
4	3.95	5.80	1.85	1.85						Núcleo de Barril
5	5.80	7.61	1.81	1.81						Núcleo de Barril
6	7.61	9.60	1.99	2.00						Núcleo de Barril
7	9.60	10.80	1.20	0.75						Núcleo de Barril
8	10.80	12.00	1.20	0.93						Núcleo de Barril
9	12.00	13.60	1.60	1.60						Núcleo de Barril
10	13.60	15.15	1.55	1.55						Núcleo de Barril

G. Tablas de Integración de Información por Pila.

Abreviaturas utilizadas:

- L/D – Longitud / diámetro
- V_P – Velocidad de la onda P
- Prof. – Profundidad de desplante calculada
- Δt – Diferencial del tiempo de arribo entre la reflexión de la onda directa y la reflexión de la base de la pila
- x – Distancia del geófono al punto de tiro
- d – Distancia entre dos geófonos
- t_d – Tiempo de retardo entre dos señales recibidas
- V_D – Velocidad de la onda directa



PILA 7

Diámetro: 0.80 m

Prof. de diseño: 15.20 m

Prof. de sondeo: 15.15 m

Relación L/D: 19.0

PIT

Ultrasonido

Prof. (m)

15.10

Clasificación
(Linkins, 2000)

A

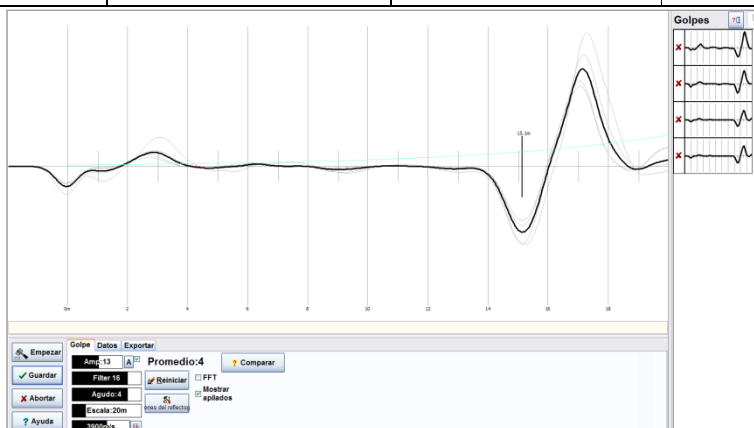
 V_P (m/s)

3900

Prof. (m)

15.20

Registro
PIT



Sísmica de Reflexión

 Δt (seg)

7.781

 $x \text{ (m)}$

0.6

 td (seg) |

0.114

(m)

0.3

 V_D (m/s)

2631

 V_P (m/s)

3848

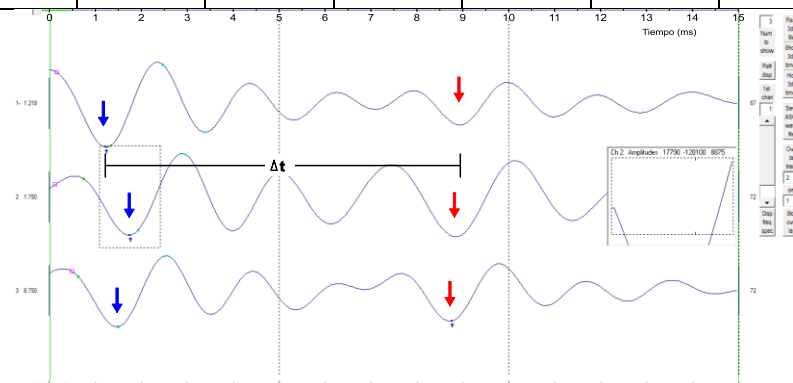
Prof.(m)

15.00

Clasificación

A

Registro
Sísmica
Reflexión



Observaciones:

Pila con buena Integridad

Cumple con la profundidad de diseño.

Defecto mínimo, se interpreta que no afecta en la integridad de la pila.

La información se corrobora con sondeo y se observa que se tiene una excelente recuperación hasta los 7.61 m. De 7.61 a 10.8 sólo se tiene una recuperación de 2.75 m. Por debajo de los 10.8 m de prof. La recuperación retorna a excelente.

No se sugieren posibles acciones a seguir.

