



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERIA

APLICACIÓN DE PRUEBAS DE BAJO IMPACTO  
PARA LA EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD DE  
PILAS DE UN PUENTE UBICADO SOBRE LA  
CARRETERA FEDERAL 187, COATZACOALCOS-  
TUXTLA GUTIERREZ, MUNICIPIO DE TECPATÁN,  
CHIAPAS.

INFORME DE ACTIVIDAD PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A :

JOSÉ DE JESÚS ROJAS NOGUEZ

ASESOR:

M C. DAVID ESCOBEDO ZENIL

2015



## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a su Facultad de Ingeniería, por la valiosa formación académica obtenida en sus aulas.

A mis profesores, por el empeño y la dedicación mostrados durante mi formación académica.

A mi asesor, M. C. David Escobedo Zenil, por su inestimable cooperación y apoyo para la conclusión de este trabajo.

A mis sinodales, Dr. Martín Cárdenas Soto, Dr. Josue Tago Pacheco, Ing. Martín Carlos Vidal García e Ing. Alejandro García Serrano, por los valiosos comentarios y observaciones hechos.

Al Ing. Aristóteles Homero Jaramillo Rivera, director general de Geoexplora SA de CV (antes Servicios Técnicos de la Tierra), por las facilidades otorgadas para el uso de los datos y la información contenida en este trabajo.

A la vida, que me ha dado tanto...

## DEDICATORIA

A mis sobrinos, Mónica, Damián, Alberto, Itzel, Yelitza, Diego y Erandi, por quienes intento hacer de este mundo un lugar mejor.

A mis cuñados, Raúl, Alfredo, Rafael, Ulises y Elías, quienes siempre están dispuestos a escucharme y aconsejarme.

A mis suegros, Rosendo y Martí, por el apoyo y cariño incondicional que nos profesan.

A mis Hermanas, Estela, Silvia, Leticia y Gabriela, quienes han sido Madres y Padres sustitutos, amigas y punto de referencia para ser siempre una mejor persona.

A mi esposa, Xochitl, por su compañía, paciencia, apoyo, consejos, regaños y todo eso que me da día con día.

Pero principalmente a mi Madre, por enseñarme a ser fuerte en las situaciones más difíciles, por su entereza, su dedicación, su apoyo incondicional, su cariño, por darme la vida, y sobre todo, por haber sido Padre y Madre con tanta dedicación.

Finalmente a mi Padre, que nos cuida desde el más allá.

# **APLICACIÓN DE PRUEBAS DE BAJO IMPACTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD DE PILAS DE UN PUENTE UBICADO SOBRE LA CARRETERA FEDERAL 187, COATZACOALCOS-TUXTLA GUTIERREZ, MUNICIPIO DE TECPATÁN, CHIAPAS.**

## **INDICE**

	Página
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
OBJETIVOS DEL ESTUDIO	3
1. ANTECEDENTES	4
2. FUNDAMENTOS DEL MÉTODO DE BAJO IMPACTO.	19
2.1 Teoría de la elasticidad	19
2.2 Propagación de ondas.	20
2.3 Fundamentos teóricos sobre el Método empleado por el PIT.	22
3. TRABAJOS REALIZADOS	24
3.1. Trabajos de Campo	24
3.2 Trabajos de Gabinete	25
4. RESULTADOS	27
4.1 Pila de cimentación 1	27
4.2 Pila de cimentación 7	29
4.3 Pila de cimentación 15	31
4.4 Pila de cimentación 16	33
5. CONCLUSIONES	35
BIBLIOGRAFÍA	36

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Esquematación de un crosshole en una pila.</i>	7
<i>Figura 2. Esquema de un registro de pozo único.</i>	9
<i>Figura 3. Esquema ilustrativo de la prueba sísmica paralela</i>	10
<i>Figura 4. Esquema de aplicación del método por ecopulso.</i>	11
<i>Figura 5. Aplicación de esfuerzos y ondas generadas</i>	14
<i>Figura 6. Reflexión de extremo libre.</i>	15
<i>Figura 7. Reflexión de extremo fijo.</i>	15
<i>Figura 8. Velocigrama de una pila sin defectos.</i>	16
<i>Figura 9. Registro de pilas con defectos</i>	16
<i>Figura 10. Elaboración de nichos y perforaciones para colocación de sensores</i>	17
<i>Figura 11. Croquis general de los pilotes estudiados</i>	24
<i>Figura 12. Acelerógrafos instalados en la cara expuesta de la pila.</i>	25
<i>Figura 13. (a) Elaboración de nichos y (b) momento en que se produce un impulso sísmico por medio un golpe de marro.</i>	25
<i>Figura 14. (a) la onda viaja libremente en el interior de la pieza hasta encontrarse con otro material para ser reflejada, la pieza no presenta defectos. (B) la onda es reflejada por el defecto en el interior de la pieza.</i>	26
<i>Figura 15. Croquis de ubicación de la pila 1.</i>	27
<i>Figura 16. Velocigrama correspondiente a la pila 1.</i>	28
<i>Figura 17. Croquis de ubicación de la pila 7.</i>	29
<i>Figura 18. Velocigrama correspondiente a la pila 7.</i>	30
<i>Figura 19. Croquis de ubicación de la pila 15.</i>	31
<i>Figura 20. Velocigrama correspondiente a la pila 15.</i>	32
<i>Figura 21. Croquis de ubicación de la pila 16.</i>	33
<i>Figura 22. Velocigrama correspondiente a la pila 16.</i>	34

## RESUMEN

Con el fin de evaluar la calidad del concreto y longitud de las pilas en un puente ubicado en la carretera federal 187, Coatzacoalcos-Tuxtla Gutiérrez, Municipio de Tecpatán, Chiapas, se decidió la realización de pruebas de integridad de bajo impacto, que permitirán determinar dichos parámetros sin afectar a las mismas. Con el conocimiento de esos parámetros es posible realizar un adecuado análisis de la cimentación existente.

Para realizar este estudio se colocaron instrumentos muy sensibles al movimiento, denominados acelerógrafos, uno en un nicho elaborado para este fin y un segundo acoplado por medio de un anclaje en un costado de la pila, los que registraron los frentes de onda que viajan a través de estos elementos y que se generaron en el primer nicho mediante impactos ligeros con un marro, asentados sobre una superficie plana horizontal del pilote. Se seleccionaron cuatro pilas para la realización de las pruebas, elegidas para obtener un muestreo representativo.

Esta metodología sísmica se apega a la descrita en la Norma ASTM D 5882 - 07, que señala el procedimiento adecuado para la toma de datos para pruebas de integridad de baja deformación en cimentaciones profundas.

## ABSTRACT

A pile integrity test based on a low strain method was applied to evaluate the concrete quality and pile length of selected piles of a bridge located in Carretera Federal 187, Coatzacoalcos-Tuxtla Gutiérrez, Tecpatan, Chiapas. This method determines these parameters without damaging the pile structure. With these parameters, found an appropriate analysis of the deep foundations is possible.

For the test, a very sensitive movement instruments, called accelerographs, were placed. One in an alcove make for this purpose and the other one coupled for an anchorage in a side of the pile. These instruments register the travel along the pile of the wave fronts, which was generated with a hand hammer in a horizontal flat surface of the foundation. Four piles where selected for the test in order to obtain a representative sampling.

This seismic method was selected in accordance to the standard ASTM D 5882 – 07, which describe the Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations.

# INTRODUCCIÓN

Los estudios de integridad en pilas y pilotes con equipo PIT (Pile Integrity Tester), desarrollado por la empresa PDI (Pile Dynamics Inc.), conforman una metodología de reciente utilización en México que se apega cabalmente a la metodología descrita en la norma ASTM D 5882 - 07.

Esta metodología se basa en las pruebas de bajo impacto y utiliza los principios de reflexión sísmica, bajo el análisis de la impedancia sísmica. Cuando una onda viaja a través de un cuerpo, esta onda se refleja en las zonas donde se localizan cambios de impedancia. Dichos cambios pueden ser producidos por alteraciones en la sección transversal de dicho cuerpo o por cambios en las propiedades elásticas del mismo.

Inicialmente, es necesario calcular la velocidad de onda del concreto que constituye la pila. Este parámetro, que será promedio a lo largo de toda la pila, permite calcular la longitud de la pila, además de variaciones en la velocidad del concreto. Lo anterior permite inferir defectos en el volumen de la pila o en la resistencia del concreto.

Esta metodología se usó en el mes de julio de 2011, para analizar la integridad y longitud de cuatro pilas que sostienen un puente ubicado en la carretera Federal 187, Coatzacoalcos – Tuxtla Gutiérrez, en el estado de Chiapas. Este estudio estuvo a cargo del personal de la empresa “Servicios Técnicos de la Tierra”.

# OBJETIVOS DEL ESTUDIO

## OBJETIVO GENERAL.

- Evaluar la integridad de las pilas estudiadas con base en la velocidad de onda compresiva, la longitud del elemento y la profundidad de desplante.

## OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar la velocidad de propagación del frente de onda longitudinal "P", tanto en onda directa como reflejada, con el fin de determinar, a todo lo largo de la pila estudiada, la calidad del concreto que lo conforma, así como cambios en su composición.
- Determinar, a partir de la velocidad sísmica del concreto y de los tiempos de reflejo, la integridad de las pilas y la presencia de posibles discontinuidades en las mismas.
- Determinar la profundidad aproximada de desplante de las pilas.



# 1. ANTECEDENTES

Las pruebas de bajo impacto tienen su primera aplicación en la evaluación de la calidad de concretos colados *in situ*. En general, este tipo de pruebas están basadas en la teoría de onda compresiva, ya sea en transmisión directa o en reflexión.

A principios del siglo XX, entre la primera y la segunda guerra mundial, la construcción de estructuras de concreto se hizo extensiva, sobre todo con fines militares. Debido al uso dado a estas construcciones, fue necesario evaluar la calidad de los concretos utilizados, lo que llevó a pruebas como la obtención de núcleos o pruebas de perforación con misiles balísticos. Por desgracia, estos métodos dañaban el elemento en evaluación.

En 1938, se publicó un método basado en la frecuencia resonante para establecer el módulo elástico del concreto. La prueba consistía en golpear especímenes prismáticos con un martillo y la frecuencia resonante era determinada por la comparación con los tonos de barras de acero calibradas. Esta fue la primera prueba no destructiva estandarizada por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en Inglés) (Carino 1994). Este método tenía la desventaja que sólo era posible ejecutarlo dentro del espectro audible.

Después de la segunda guerra mundial, se desarrollaron sensores que pudieron medir frecuencias no audibles. Los primeros transductores median cambios de voltaje altos, con el paso del tiempo, el desarrollo de componentes piezoeléctricos permitió desarrollar equipos que registraran cambios de voltaje muy pequeños, con lo que la precisión de las mediciones se hizo mayor.

En 1949 el *American Concrete Institute* desarrollo el primer método basado en la transmisión de ondas por ultrasonido. Este método permitía conocer la velocidad de transmisión de onda compresiva, colocando un transmisor en un extremo de un espécimen y un receptor en el opuesto, lo que permitía medir el tiempo de viaje de la onda de un punto a otro. La velocidad resultante era asociada a una calidad del concreto. Esta prueba tenía la deficiencia de que el concreto no es un buen conductor de ondas de alta frecuencia, por lo que sólo era aplicable a elementos delgados.

Fue en la década de los años 60's que se desarrolló un equipo que media la calidad del concreto mediante la aplicación de ondas compresivas de baja frecuencia generadas por un impacto mecánico, sin embargo, no fue sino hasta los 70's que se desarrolló una

aplicación práctica para la aplicación en pruebas de integridad para cimentaciones profundas (Hussein & Goble 2004).

La cimentación de una construcción es una de las partes más importantes debido que será la que dará soporte y estabilidad a la misma. Existen diferentes tipos de cimentaciones: las cimentaciones superficiales como las zapatas o las losas, se utilizan cuando la construcción es muy ligera o cuando el terreno presenta fuerte resistencia a la deformación. Las cimentaciones profundas, como pilas y pilotes, se utilizan cuando se considera que la cimentación tendrá que soportar un gran peso y/o cuando el terreno es altamente deformable, por lo que se vuelve necesario que la cimentación se asiente a profundidad, sobre un estrato más resistente (Paniagua et al. 2010).

El uso de cimentaciones profundas se remonta a varios siglos atrás. Civilizaciones como las de los antiguos egipcios, griegos, fenicios, romanos, chinos, mesopotámicos y otras las utilizaban (Hussein, 2004). Estas culturas usaban preferentemente pilotes de madera hincados en el suelo, mientras que en la actualidad la mayoría de estos elementos son de concreto ya sean colados in situ o prefabricados e hincados en el terreno.

Con la evolución de la sociedad, la tecnología, los materiales y las dimensiones de las estructuras construidas, se ha vuelto necesaria la evaluación de las pilas, ya sean nuevas o antiguas, que sostienen las construcciones. Lo anterior con el fin de determinar la calidad, integridad y por ende, el buen funcionamiento de dichos elementos estructurales.

Para la evaluación de la integridad de pilas y pilotes se han implementado métodos, no destructivos, los que proveen información sobre las condiciones de la estructura sin alterar la integridad de la misma (Paikowsky, 2003). Estos están basados en la teoría de onda compresional, ya sea por transmisión directa o por reflexión.

La evolución histórica de la teoría de onda compresional y su aplicación en pruebas de bajo impacto para la evaluación de la integridad de pilas, con base en la publicación de Mohamad H. Hussein (2004) se puede resumir de la siguiente manera:

- La teoría necesaria para la implementación de las pruebas de integridad comenzó a desarrollarse con los estudios de Galileo Galilei sobre la dinámica de los cuerpos en movimiento. Posteriormente esta se vio enriquecida por Robert Hooke en 1678, el que analizó científicamente por primera vez las propiedades elásticas de los materiales. En 1773 se tuvo una contribución de manera significativa al entendimiento de la mecánica de los cuerpos elásticos y en 1820

se presentaron las primeras ecuaciones fundamentales de la teoría matemática de la elasticidad.

- En 1807, se desarrolló un método para calcular los esfuerzos en una barra elástica que ha sido sometida a un impacto longitudinal considerando la propagación de la onda compresiva. Posteriormente, se dedujo una solución inventiva en forma de una expresión analítica, al problema de una barra elástica fijada en un extremo y sometida a un impacto axial en el otro. También se resolvió el problema de un impacto longitudinal en barras prismáticas en términos de una función discontinua. En 1883, se producen tablas numéricas y diagramas ilustrando la respuesta de una barra sometida a impactos con masas de diferentes pesos utilizando la solución de Boussinesq. Con esto demuestra que el máximo esfuerzo ocurre en el extremo fijo de la barra. Finalmente, se hicieron grandes contribuciones a la teoría de la compresión de los cuerpos elásticos al presentar soluciones en tablas numéricas para simplificar la aplicación práctica con propósitos ingenieriles.
- Por otro lado, el estudio de vibraciones mecánicas y armónicas comenzó con los estudios de Pitágoras, en los que mostró la relación entre densidad, tensión y frecuencia. Posteriormente, Joseph Sauver es considerado el primero en medir la frecuencia de una cuerda vibrando. Sauver sugirió el nombre de fundamental al modo de menor frecuencia y armónicos a sus otros modos. Daniel Bernoulli fue el primero en proponer la superposición lineal de los armónicos y Joseph Fourier estableció el método de series armónicas en 1822.
- La ecuación que describe la vibración de una cuerda, propuesta por Jean Le Rond d'Alembert es idéntica a la propuesta por Lagrange para describir el sonido de un órgano tubular. Esta ecuación es hoy conocida como la **ecuación de onda**.
- En 1930 se expande la teoría de 1807 para abarcar a barras no uniformes y con fuerzas aplicadas en cualquier sitio a lo largo de una varilla delgada. 1931, D.V. Isaacs propone el mecanismo de transferencia de una onda unidimensional para la aplicación práctica de la teoría de onda compresional en el análisis de pilas hincadas.
- En 1940 A.E. Cummings demuestra la superioridad del análisis por el método de ondas compresionales para resolver el impacto longitudinal a una pila hincada, sobre las fórmulas de energía de impacto de tipo Newtoniano. En ese mismo año Edward A.L. Smith produce la primera solución general para la aplicación

práctica de la teoría de onda compresiva en pilas. Para el año 1942, K. J. de Juhasz desarrollo un método gráfico usando las características de la solución discreta a la ecuación de onda propuesta por Smith. En 1943 Karl Terzaghi provee una extensa discusión sobre como ocurre el fenómeno de propagación de onda en una pila después de ser golpeada por un martillo y sobre la aplicación de la teoría de impacto longitudinal en pilas.

Con base en esta evolución teórica, en la década de los 70's se desarrollaron las primeras pruebas no destructivas para la evaluación de la integridad de pilas. A partir de esa fecha diversos métodos, apoyados en la aplicación de la teoría de onda compresiva, están disponibles para que los ingenieros en cimentaciones puedan revisar la longitud y calidad de las cimentaciones profundas, ya sean nuevas o antiguas(Rausche 2004). Los más comunes se describen a continuación.

### **Crosshole**

La técnica de *crosshole* está basada en la transmisión directa de onda compresiva entre un transmisor y un receptor. Su aplicación sólo es posible en pilas coladas *in situ* debido a que es necesaria la instalación de tubería, ya sea metálica o de PVC, a todo lo largo de la pila.

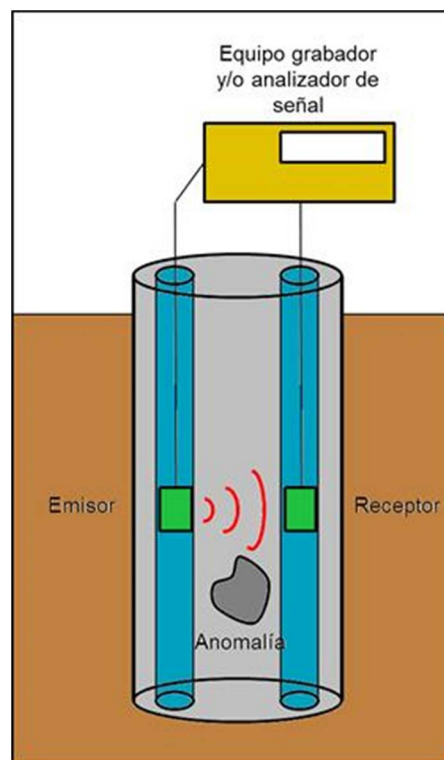


Figura 1. Esquema de un crosshole en una pila.

Para aplicar esta prueba es necesario que previo al vaciado de concreto se instalen dos o más tubos a lo largo de toda la pila, los que tendrán que estar llenos de agua. Posterior al vaciado y al tiempo de curado del concreto, en uno de los tubos se introduce un emisor o fuente, mientras que en otro se introduce un sensor receptor, generalmente un geófono. Ambos, emisor y receptor, descienden a la misma profundidad en intervalos diseñados de acuerdo al interés de estudio de la pila. La fuente genera un pulso, que puede ser de bajo impacto o ultrasónico, el que viajará por el interior de la estructura hasta llegar al receptor. La velocidad se puede calcular debido a que se conoce la distancia entre los tubos y se mide el tiempo de arribo de la onda (figura 1).

Debido a que el concreto debe ser el mismo utilizado en toda la pila, se espera que la velocidad registrada sea similar a todo lo largo de la pila. Una variación importante en la velocidad se puede asociar a un defecto importante en la pila, ya sea una discontinuidad o una remezcla del concreto.

Esta prueba ofrece la ventaja de que se puede conocer la posición exacta de cualquier anomalía dentro de una pila. Su desventaja es el costo, debido a que requiere la instalación de la tubería, además de que es una prueba que sólo se puede realizar si hay una planificación previa al colado de la pila y los resultados corresponden únicamente al concreto que se localiza entre los tubos.

### **Registro de pozo único**

En éste método es necesaria la instalación de un tubo a lo largo de la pila, previo al colado de la misma. La prueba se basa en la transmisión directa de una onda compresiva y consiste en introducir un sensor o transductor en el tubo, colocándolo a profundidades de intervalos constantes. En el cabezal de la pila se producen impulsos, ya sean por medio de golpes de marro o una fuente ultrasónica. Las ondas viajarán desde el cabezal a lo largo de la pila hasta alcanzar el sensor en el pozo (figura 2).

Dado que se conoce la profundidad a la que se localiza el sensor, su distancia a la fuente y se mide el tiempo que tarda en registrarse el impulso en el sensor, es posible calcular la velocidad del concreto a lo largo de la pila. Si la velocidad es similar en toda la pila, ésta se considera íntegra. Variaciones importantes en la velocidad calculada podrían representar defectos de importancia tales como discontinuidades en la pila o remezcla del concreto.

Las ventajas de este método es que es posible calcular la profundidad exacta de cualquier anomalía. La desventaja es el costo, debido a que requiere la instalación de

la tubería previo al colado de la pila, además que solo se evalúa el concreto entre la fuente y la ubicación del sensor, por lo que si alguna discontinuidad queda fuera de esta trayectoria no será detectada.

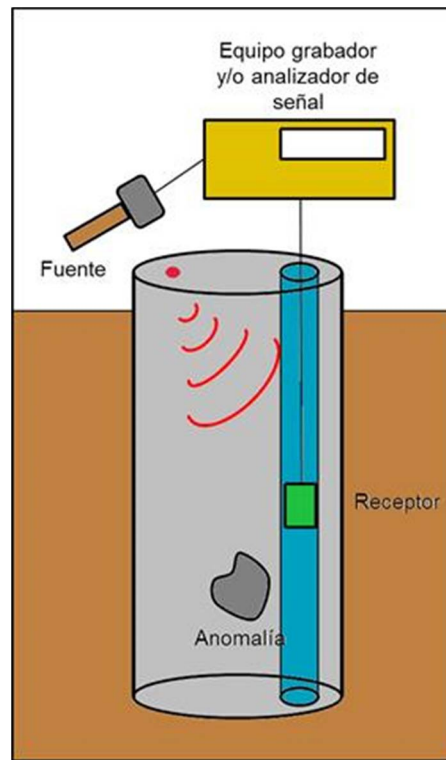


Figura 2. Esquema de un registro de pozo único.

### **Prueba sísmica paralela**

Esta prueba requiere la preparación de un pozo adomado paralelo y a un costado de la pila. El método se basa en la transmisión directa de onda compresiva y consiste en introducir un sensor en el pozo y con un marro o cualquier otra fuente, generar un pulso en el cabezal de la pila, el que viajara a través de la pila y generara refracciones en su contacto con el terreno adyacente. La primer señal detectada en el sensor se considera la correspondiente a la que viajo por la pila (figura 3).

Las ventajas de este método es que es posible calcular la velocidad del concreto a todo lo largo de la pila y que, en caso de detectarlas, se puede calcular la profundidad exacta de las anomalías. Las desventajas son el costo de instalación del pozo paralelo, y que si alguna anomalía se ubica al lado contrario de la ubicación del pozo, esta no será detectada. Se debe mencionar, que además existe la problemática de que el pozo se debe hacer lo más cercano posible a la pila, lo que, sin el cuidado necesario, podría dañar la pila o, en caso contrario, quedar demasiado separado de ella.

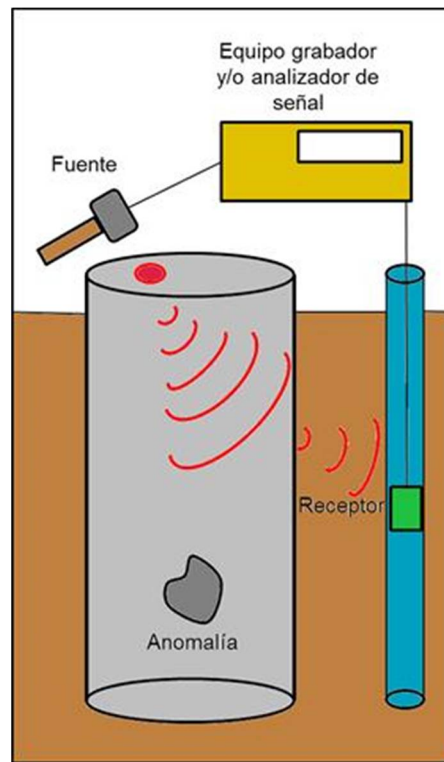


Figura 3. Esquema de la prueba sísmica paralela

### **Método de vibración**

Para ejecutar esta prueba es necesario instalar un oscilador de frecuencia variable en el cabezal de la pila. Los sensores medirán la fuerza aplicada por el oscilador, además de la velocidad de respuesta del cabezal de la pila a la variación de frecuencias.

Este método tiene la ventaja de que entrega resultados cuantitativos. Las desventajas es que es complicado y relativamente costoso instalar un oscilador con la potencia suficiente para causar resonancia en la pila.

### **Método de ecopulso**

El método de ecopulso es el primer y más antiguo de los desarrollados a partir de los años 70's. La prueba se basa en la reflexión de onda compresiva y consiste en colocar un sensor en el cabezal de la pila, a un costado del mismo un martillo genera un pulso por medio de un golpe ligero. El pulso viajará a través de la pila hasta alcanzar un cambio de medio, ya sea una discontinuidad, un cambio en la calidad del concreto o el fondo de la misma. Al alcanzar cualquiera de estas situaciones, el pulso sufrirá una reflexión por lo que regresara por la pila hasta la posición del sensor, el que registrara el tiempo de viaje de la onda (figura 4).

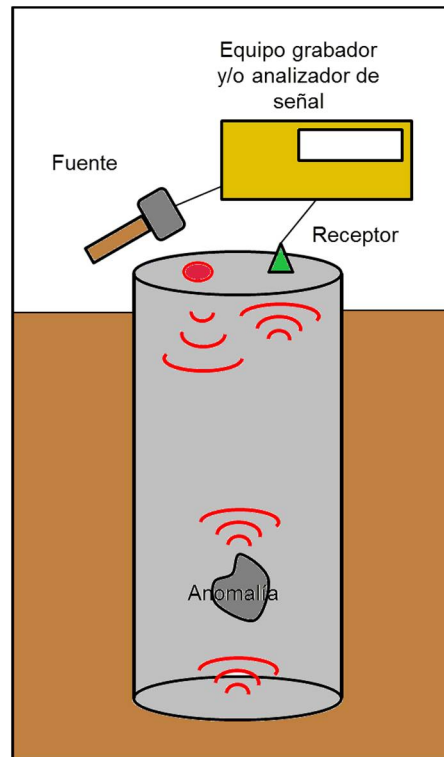


Figura 4. Esquema de aplicación del método por ecopulso.

Este método ofrece todo un abanico de posibles resultados, debido a que si se conoce la longitud de la pila se puede calcular la velocidad del concreto y asociarlo a una calidad del mismo. Por otro lado, si se conoce la calidad del concreto, o su resistencia, esta se puede asociar a una velocidad promedio con la que se puede calcular la longitud de la pila o la distancia hasta la que viajó la onda y, por consiguiente, conocer la profundidad de posibles anomalías.

Las ventajas de este tipo de prueba comienzan con el costo, debido a que no es necesaria ninguna preparación especial, más allá de pulir el cabezal de la pila para remover el concreto contaminado. Se puede aplicar en cualquier pila o pilote, ya sean nuevos o antiguos. El equipo con el que se ejecuta la prueba es pequeño, por lo que se puede transportar y ejecutar la prueba en cualquier lugar en la que esta se encuentre. Puede arrojar información sobre varios defectos a lo largo de la estructura.

Las desventajas de esta prueba, se refieren a que se necesita experiencia para poder interpretar los registros, el registro de la onda se ve afectado por la resistencia que tenga el suelo encajonante, por lo que la máxima longitud que se puede estudiar puede ir de 30 a 60 veces el diámetro de la estructura (Hussein et al. 1992). Defectos pequeños pueden no ser detectados, mientras que grandes defectos pueden evitar que



se registre a longitud total de la pila, enmascarandola por reflexiones múltiples de la anomalía. Puede haber ocasiones en que los resultados, debido a la calidad de los registros, no sean concluyentes.

### **Método de Respuesta Transitoria**

El concepto de este método es muy similar al utilizado en el de ecopulso; un martillo golpea el cabezal de una pila en el que también está colocado un sensor. La onda generada viaja a través de la estructura y se refleja en donde localiza cambios de medio.

La principal diferencia en la aplicación de este método es que el martillo que funciona como fuente debe estar instrumentado con un acelerógrafo especial, de tal forma que tenga la capacidad de medir la fuerza con que se aplicó el impulso. El análisis de la señal registrada se puede realizar de la misma manera que en el método de ecopulso, pero el resultado principal de este método es el espectro del cociente entre la velocidad y la fuerza (Rausche et al. 1991).

La ventaja de este método es que se puede obtener mayor información cuantitativa de la estructura, además de todas las enumeradas para el ecopulso. Las desventajas son que el costo es ligeramente mayor debido a la necesidad del martillo instrumentado y que el análisis de frecuencias está limitado en función del peso del martillo utilizado como fuente.

### **Método de dos acelerómetros**

Para la aplicación de este método es necesario que se encuentre descubierto, por lo menos 1.5 m de la estructura a evaluar. Se colocaran dos acelerómetros, uno en el cabezal de la pila y el otro, por medio de un anclaje, en un costado lo más alejado posible del primero. El procedimiento para la ejecución de la prueba es el mismo que el de ecopulso y se basa de la misma manera en la reflexión de onda compresiva.

Las ventajas que ofrece este método, además de las enumeradas para el de ecopulso, son la de obtener mayor información sobre la misma pila, debido a que se puede comparar los resultados obtenidos por cada sensor, la posibilidad de calcular la velocidad del concreto, debido a que conocemos la distancia entre sensores y se puede medir la diferencia de tiempos de arribo. Las desventajas son que se necesita una buena parte de la estructura descubierta para poder tener una distancia adecuada entre sensores. Se necesita mayor experiencia para el análisis e interpretación de los registros.

Comparativamente los métodos de onda directa, al no ser afectados por la resistencia del suelo, generan datos de mejor calidad y más confiables a profundidad (Bermudez Deana 2005), sin embargo, de los métodos no destructivos descritos, el más usado es el de ecopulso (Rausche 2004) debido al bajo costo de aplicación, la posibilidad de ensayar cualquier pila sin preparaciones previas y una calidad confiable en los registros (Paniagua et al. 2010).

Los métodos de onda reflejada están basados en el método de ecopulso y son muy similares entre sí (Rausche et al. 1992), las diferencias entre ellos son la forma de procesar los datos y los resultados obtenidos, sin embargo cuando los defectos son poco significativos pueden llegar a compensarse con la resistencia del suelo encajonante y no ser registrados en las pilas. También, si los defectos de pila provocan una reducción de la impedancia de un 50 %, este enmascarará la longitud total de la pila porque sólo se observarán las reflexiones correspondientes a esta anomalía (Rausche et al. 1991).

La Prueba de Integridad de Pilas (PIT por sus siglas en inglés) basa su procedimiento en el método de ecopulso. Para realizar un adecuado análisis, se apoya en la propiedad llamada impedancia. La impedancia es la resistencia que opone la pila a la propagación de ondas por cambio de velocidad (Rausche et al. 1988).

Cuando una onda viaja a través de un medio con una cierta impedancia y hace contacto con otro medio con una impedancia diferente, se produce una reflexión de onda. Si la impedancia del segundo medio es menor que la del primero, la reflexión de la onda se observará con signo positivo, si la impedancia es mayor, la reflexión se podrá observar con signo negativo.

La impedancia es una propiedad de los materiales que es directamente proporcional al área transversal de la pila y al módulo elástico. Por esta razón, cuando la pila sufre ensanchamientos o estrechamientos en el fuste o discontinuidades debido a errores durante la construcción, lo que implica cambios en el área transversal, o cambios en la calidad del concreto, que indican cambios en el módulo elástico del mismo, se observan reflexiones de onda en los acelerogramas (figura 9) que se obtienen en esta prueba (Paniagua et al. 2010).

Las fuerzas aplicadas en una pila pueden ser de tensión o de compresión, en el caso de la prueba PIT, el impulso genera una onda compresiva. Dicha onda viaja a través de la pila con una cierta impedancia. Al encontrarse en su viaje con un medio con una impedancia diferente, la onda sufre una reflexión. Si el medio tiene una impedancia

mayor, la onda se reflejará como una onda compresiva. Caso contrario, si el medio posee una impedancia menor, la onda se verá reflejada como una onda extensiva (Rausche et al. 2002).

Considerando el cabezal de la pila como el origen de un eje cartesiano, cuyo sentido positivo es en dirección a la punta de dicho elemento. Si se aplica un esfuerzo compresivo en el cabezal, como lo haría un golpe de marro, se genera una onda que viaja en dirección a la punta, con un vector de velocidad positivo. De la misma manera, si se aplica un esfuerzo de tensión en el cabezal, la onda viajará en dirección a la punta, pero el vector de velocidad tendrá sentido negativo (figura 5).

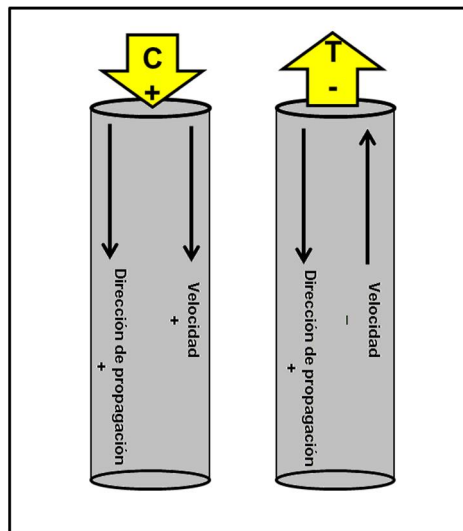


Figura 5. Aplicación de esfuerzos y ondas generadas

Cuando la onda viaja a través de la pila y se encuentra con un cambio de medio, si la impedancia del nuevo medio es menor a la que del medio original, se produce una reflexión que se denomina de extremo libre. En ésta, la onda compresiva, debido a la inercia del movimiento de las partículas, se refleja como una onda extensiva, que viajará en dirección al cabezal con un vector de velocidad de signo negativo, mientras que la onda extensiva se refleja como una onda compresiva con un vector de velocidad de signo negativo (figura 6).

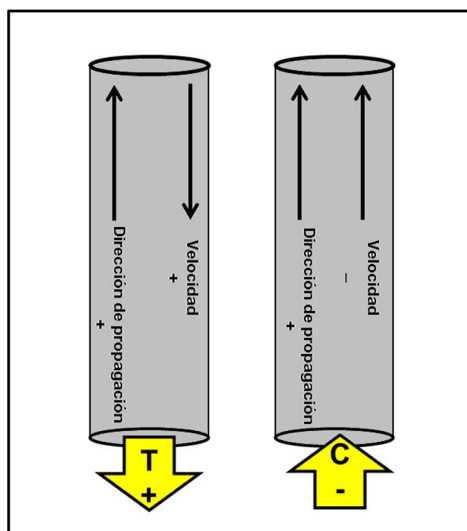


Figura 6. Reflexión de extremo libre.

Por el contrario, si la impedancia del segundo medio es mayor a la del medio original, se observa una reflexión de extremo fijo. En ésta, una onda compresiva se reflejará como una nueva onda compresiva, con dirección de propagación y velocidad de signo negativo, mientras que una onda extensiva se reflejará como una nueva onda extensiva, con dirección de propagación positiva y velocidad positiva (figura 7).

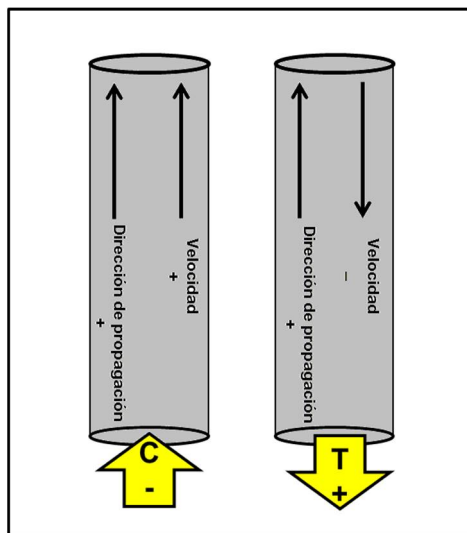


Figura 7. Reflexión de extremo fijo.

El gráfico obtenido en la prueba PIT es un velocigrama. Este velocigrama registra los cambios de velocidad a lo largo de la pila. Si la pila es homogénea y continua, sin cambios ni alteraciones, en el registro solo se observará la cresta correspondiente al impulso inicial y la cresta correspondiente a la reflexión de punta (figura 8).

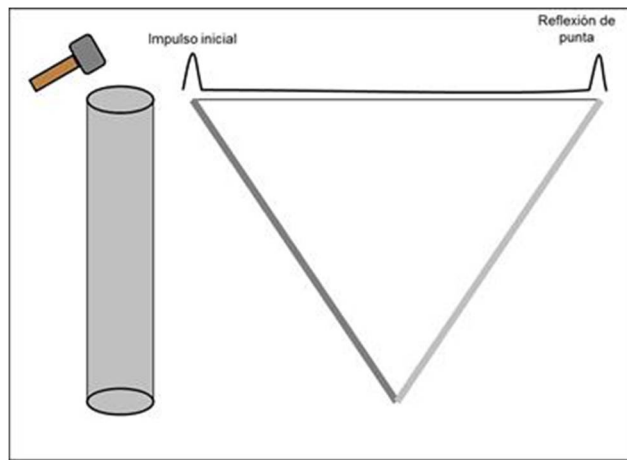


Figura 8. Velocigrama de una pila sin defectos.

Cuando la pila presenta defectos, estos se verán reflejados de acuerdo con su tipo y magnitud. Las reducciones o ampliaciones, siempre que sean del mismo porcentaje, sin importar su geometría, se verán reflejadas de la misma forma (Schellingerhout & Muller 1996). Las reducciones se observan como crestas, debido a que son disminuciones de impedancia, mientras que los ensanchamientos se observan como valles. De la misma manera, cuando el concreto baja de la calidad, se observaran crestas y si aumenta la calidad, las reflexiones se observan como valles (figura 9).

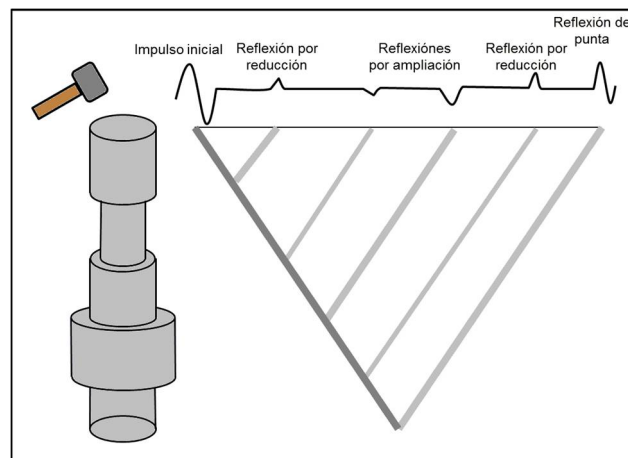


Figura 9. Velocigrama de una pila con defectos.

Un factor adicional que añade impedancia a las pilas es la resistencia del suelo encajonante. Este término se define como la resistencia que oponen los materiales que componen el subsuelo a ser deformados. Cuando el suelo es poco resistivo o altamente deformable, la onda viaja libremente por la pila, pero cuando la resistencia del suelo es alta, suelos poco deformables, añade fricción y, por lo tanto, añade impedancia (Ambrosini & Ezeberry 2005).

Existen ocasiones en las que el cabezal de la pila es inaccesible debido a que el elemento ya está cargando una estructura. En estos casos es necesario anclar un sensor a un lado de la pila o elaborar un nicho con una superficie plana horizontal en la que se pueda colocar un sensor (figura 10). Debido a que en la mayoría de estas situaciones no se cuenta con información sobre la construcción de la pila, es recomendable utilizar el método de dos acelerómetros para calcular la velocidad del concreto y con este valor calcular la longitud de la pila en estudio (Rausche et al. 2002).



Figura 10. Elaboración de nichos y perforaciones para colocación de sensores

También es importante tomar en cuenta el peso del martillo con el que se produce el impulso. Éste debe variar entre 0.5 y 5 Kg. Martillos pequeños producen frentes de onda cortos pero pueden introducir una gran cantidad de altas frecuencias, mientras que martillos más pesados producen frentes de onda más amplios y con poco contenido de altas frecuencias (Rausche, Likins, & Shen, 1992). Cuando se desconoce totalmente la longitud de la pila es necesario realizar pruebas con martillos de diferentes pesos.

Las pruebas con martillos pequeños, por producir frentes de onda de pequeña longitud, permiten observar defectos pequeños a lo largo de la pila, pero si ésta es muy larga se corre el riesgo de que no se alcance a localizar la reflexión de punta, ya sea porque se disimule con defectos a lo largo del fuste o porque la atenuación sea grande y desaparezca la señal.

Las pruebas con martillos grandes permiten alcanzar mayores profundidades debido a que producen frentes de onda con longitudes más grandes. Con estas herramientas se corre el riesgo de pasar por alto defecto que se encuentran por debajo de la longitud de onda, o, si la pila es muy corta, que no se observe la reflexión de punta.

Los estudios publicados por Paniagua et al, en 2010 demostraron que el estudio en

pilas es efectivo al localizar anomalías en pilas, las que fueron extraídas y confirmados los defectos. De la misma forma, los estudios de Rausche et al de 2020 y los de Hussein et al de 1992, demostraron que la aplicación de este método en pilas con estructuras sobre los cabezales son igual de efectivas con la diferencia que es necesario anclar los sensores a un costado de la pila.

La evaluación de la calidad del concreto se puede hacer con base en la velocidad de onda calculada tomando como referencia la tabla 1 dada por Whiterhurts en 1991.

Velocidad de pulso (m/s)	Calidad
Mayor que 4570	Excelente
De 3660 a 4570	Bueno
De 3050 a 3660	Cuestionable
De 2130 a 3050	Pobre
Menor que 2130	Muy pobre

Tabla 1. Calidad del concreto con base en la velocidad de onda compresional (Carino, 1994)

La velocidad del concreto y su relación con la calidad puede variar dependiendo de la calidad de los agregados, la relación agua cemento al momento de la preparación del cemento y el tiempo y tipo de curado (Carcaño et. al. 2004). Sin embargo, esta variación se observa dentro de los límites establecidos en la tabla.

## 2. FUNDAMENTOS DEL MÉTODO DE BAJO IMPACTO.

### 2.1 Teoría de la elasticidad

Las ondas elásticas se originan cuando, en un medio estable, una fuerza externa rompe dicha estabilidad y genera el movimiento de alguna de las partículas que componen dicho medio. Esta perturbación se transmite a otras partículas por todo el medio con una velocidad que depende de las propiedades elástico-dinámicas del medio.

Cuando una fuerza externa actúa sobre un cuerpo, se produce un esfuerzo. El esfuerzo se define como la razón de fuerza aplicada sobre unidad de área, es identificado por la letra  $\sigma$  y se expresa por la ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (1)$$

Por convención, se considera que cuando la fuerza se aplica perpendicular a alguna cara del cuerpo y en dirección a este se denomina de compresión y tiene signo positivo, mientras que si es en dirección contraria al cuerpo se denomina tensión y se le asigna signo negativo, de tal manera que:

$$\text{compresion} = \frac{F}{A}, \quad \text{tensión} = \frac{-F}{A}.$$

Cuando se aplica un esfuerzo sobre un cuerpo, este produce una deformación en el mismo. La deformación se define como el cambio relativo en las dimensiones del cuerpo, es identificado por la letra  $\varepsilon$  y se expresa por la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta u}{l} = \frac{\delta u}{\delta l}, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\text{diferencia de dimensiones}}{\text{dimensiones originales}}.$$

La relación entre el esfuerzo y la deformación está expresado por la *ley de Hooke*, la que establece que “la deformación unitaria que sufre un cuerpo elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada” (Telford, W. et al, 1990).

y se expresa por la ecuación:



$$\sigma = k\varepsilon , \quad (3)$$

donde  $k$  es la constante de elasticidad del cuerpo.

La constante de elasticidad, es una propiedad inherente del material y proporciona una noción acerca de la rigidez del material; mientras mayor sea su valor, mayor será el esfuerzo necesario para generar una deformación.

Debido a que la ecuación 3 es aplicable sólo a cuerpos unidimensionales, es necesario separar en componentes normales y tangenciales cuando se desea trabajar con cuerpos de más dimensiones, de tal forma que se obtienen dos módulos. El módulo de Young (ecuación 4), que se define para esfuerzos y deformaciones normales, y el módulo de rigidez (ecuación 5), que está definido para deformaciones de cizalla.

$$E = \frac{\sigma_{ii}}{\varepsilon_{ii}} ; i = x, y, z, \quad (4)$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_{ii}}{\varepsilon_{jj}} ; i, j = x, y, z, i \neq j. \quad (5)$$

## 2.2 Propagación de ondas.

Si a un cuerpo elástico se le aplica una fuerza en la dirección  $x$ , los esfuerzos en la cara en la que se aplica se definen por:

$$\sigma_{xx} + \frac{\delta\sigma_{xx}}{\delta x} dx , \quad \sigma_{yx} + \frac{\delta\sigma_{yx}}{\delta x} dx , \quad \sigma_{zx} + \frac{\delta\sigma_{zx}}{\delta x} dx .$$

De esta manera, se deduce que los esfuerzos que afectan las dimensiones del cuerpo son los diferenciales, por lo que la fuerza total por unidad de volumen en la dirección del área en la que se aplica la fuerza es:

$$F = \left( \frac{\delta\sigma_{xx}}{\delta x} + \frac{\delta\sigma_{yx}}{\delta x} + \frac{\delta\sigma_{zx}}{\delta x} \right). \quad (6)$$

Si se considera que la ley de Newton dice que la fuerza es igual a la masa por la aceleración, y que la aceleración es la segunda derivada de la posición con respecto del tiempo:

$$F = \rho \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = \left( \frac{\delta \sigma_{xx}}{\delta x} + \frac{\delta \sigma_{yx}}{\delta x} + \frac{\delta \sigma_{zx}}{\delta x} \right). \quad (7)$$

donde  $\rho$  es a densidad y  $u$  el desplazamiento en la dirección  $x$ .

Si ahora, por practicidad, se considera que el cuerpo en estudio tiene una longitud mucho mayor a su área transversal, los esfuerzos tangenciales se vuelven despreciables, de tal manera que la ecuación 7 se reduce a:

$$\rho \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = \frac{\delta \sigma_{xx}}{\delta x}. \quad (8)$$

Sustituyendo (2) en (4) y despejando

$$\sigma_{xx} = E \varepsilon_{xx} = E \frac{\delta u}{\delta x} \quad (9)$$

sustituyendo (9) en (8):

$$\rho \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = \frac{\delta}{\delta x} \left( E \frac{\delta u}{\delta x} \right) = E \frac{\delta^2 u}{\delta x^2}. \quad (10)$$

Reordenando 10:

$$\frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\delta^2 u}{\delta x^2}. \quad (11)$$

La ecuación 11 es la ecuación que describe la propagación de ondas en un medio unidireccional. Esta ecuación puede describir la transmisión de ondas, no solo en medio sólidos, sino también describe ondas de presión en una columna de gas o ondas de superficie en un líquido.

Si consideramos que el cuerpo analizado tiene un comportamiento armónico, de tal forma que presenta estiramientos y compresiones simultáneas a lo largo de diferentes posiciones, que se repiten en el espacio y el tiempo, la ecuación que define el desplazamiento en dicho cuerpo puede expresarse como:

$$U = A \sin(kx - \omega t), \quad (12)$$

donde  $k$  es el número de onda y  $\omega$  es la frecuencia angular .

Si sustituimos (12) en (11),

$$\frac{\delta^2 [A \operatorname{sen}(kx - \omega t)]}{\delta t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\delta^2 [A \operatorname{sen}(kx - \omega t)]}{\delta x^2} . \quad (13)$$

desarrollando por separado el lado izquierdo y el lado derecho de (13)

$$\frac{\delta^2 [A \operatorname{sen}(kx - \omega t)]}{\delta t^2} = \frac{\delta}{\delta t} [-A\omega \cos(kx - \omega t)] = -A\omega^2 \operatorname{sen}(kx - \omega t) = -\omega^2 u , \quad (14)$$

$$\frac{\delta^2 [A \operatorname{sen}(kx - \omega t)]}{\delta x^2} = \frac{\delta}{\delta x} [Ak \cos(kx - \omega t)] = -Ak^2 \operatorname{sen}(kx - \omega t) = -k^2 u . \quad (15)$$

Sustituyendo (14) y (15) en (13)

$$-\omega^2 u = -\frac{E}{\rho} k^2 u , \quad (16)$$

desarrollando (16)

$$\frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \Rightarrow c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} , \quad (17)$$

donde  $c$  es la velocidad de onda y se observa que ésta depende, únicamente, de las propiedades elásticas del material.

### **2.3 Fundamentos teóricos sobre el Método empleado por el PIT.**

Cuando se golpea una pila con un martillo, se genera una onda de compresión que se propaga a lo largo del fuste con una velocidad que es función exclusivamente de las características del material del pilote. La velocidad de propagación  $c$  es dada por:

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

donde  $E$  es el módulo de elasticidad,  $g$  es la aceleración de la gravedad  $\rho$  es la densidad del material del pilote.

Conforme se propaga, la onda sufre reflexiones en su trayecto, que pueden ser provocadas por variaciones en las características del material, por la presencia de fricción o resistencia de punta, o aun, por el cambio de material en la punta del pilote.

Se define como “impedancia” del pilote a la expresión:

$$Z = \frac{EA}{c} = A \sqrt{\frac{\rho E}{g}}$$

donde Z es la impedancia y A es el área de sección del pilote.

Cualquier variación de impedancia a lo largo del pilote provoca reflexiones de la onda. Estas reflexiones, al alcanzar el punto donde está instalado el sensor, provocan una variación brusca de la velocidad de desplazamiento de la partícula en dicho punto. Un aumento de impedancia está relacionado con una reducción en la velocidad, mientras que una disminución de la impedancia con un aumento de velocidad. En la punta del pilote se comporta como una gran disminución de impedancia, por lo que puede ser visto como un aumento de velocidad.

Para el concreto, la velocidad de onda varía conforme sus características, pero los valores usuales de velocidad para bajo impacto están entre 3600 m/s y 4500 m/s, pudiendo considerarse que 4000 m/s es un valor promedio para un concreto de buena calidad.

### 3. TRABAJOS REALIZADOS

#### 3.1. Trabajos de Campo

Las pruebas de integridad se realizaron en cuatro pilas del puente (figura 11), mediante la técnica de dos acelerógrafos, colocados en una cara expuesta de la pila. Los sensores o acelerógrafos se colocaron de manera alineada, uno en la parte superior y otro paralelo en la parte inferior (figura 12).

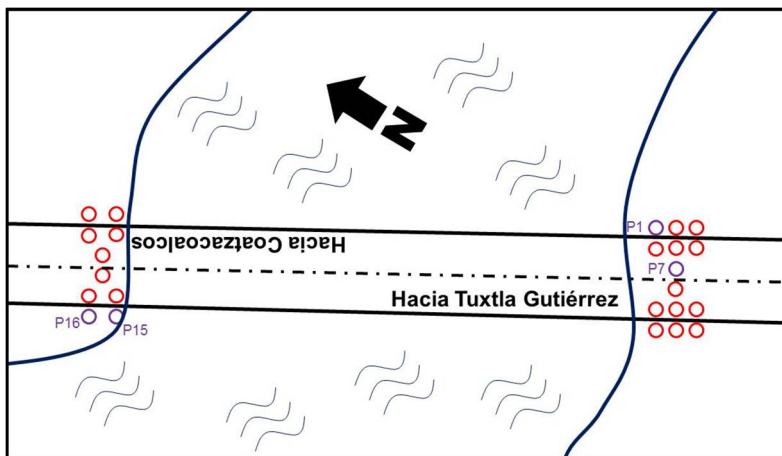


Figura 11. Croquis general de los pilotes estudiados

Los trabajos de campo consistieron en producir pequeñas perturbaciones mediante impactos de martillo asentados junto al sensor superior, precisamente en un nicho elaborado en la cara de la pila (figura 13), a estos puntos de impacto se les denomina punto de tiro (PT), los que sistemáticamente se realizaron variando la frecuencia de grabación de 50 a 150 Mhz, el peso de los martillos y la configuración de los geófonos, ya que se realizaron registros con un solo sensor, para obtener el suficiente número de registros que permitan llegar a resultados confiables a través de una estadística.

Las vibraciones producidas por estas pequeñas perturbaciones viajan a través del concreto en dirección vertical y son registradas en los puntos de medición donde se encuentran los acelerógrafos separados de 100 a 200 cm entre sí, situación que permite determinar directamente las velocidades de propagación en la parte expuesta de la pila en diferentes trayectorias.

En los trabajos de campo se utilizó un equipo analizador marca PDI, modelo *PIT FV starter*, de 2 canales, grabación en disco y selectores de filtros, amplitudes y grado de sensibilidad (ganancias). Las curvas de velocidad se grabaron en la tarjeta de memoria del equipo y posteriormente se realizó un respaldo en un dispositivo de memoria externo

para su posterior análisis a través del software PIT-W de Pile Dynamics Inc.



Figura 12. Acelerógrafos instalados en la cara expuesta de la pila.

Los acelerógrafos fueron de la marca PDI, los que captaron las vibraciones producidas por los impactos de martillo asentados en un nicho elaborado en una de las caras del pilote. Se realizaron réplicas de los impactos con el fin de obtener un mayor número de registros y, por ende, mayor calidad en la recolección de los datos.



Figura 13. (a) Elaboración de nichos y (b) momento en que se produce un impulso sísmico por medio un golpe de marro.

### 3.2 Trabajos de Gabinete

A partir de la teoría de la reflexión sísmica, la onda generada en el punto de excitación viaja libremente en el interior del pilote, hasta encontrarse con un cambio de impedancia, representado por una frontera, defectos en el concreto o la presencia de otro material, donde es reflejada (figura 14) situación que, como se podrá observar, respeta cabalmente el procedimiento establecido por la Norma ASTM D5882-07.

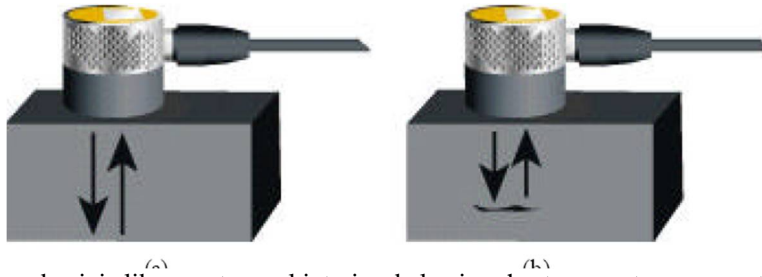
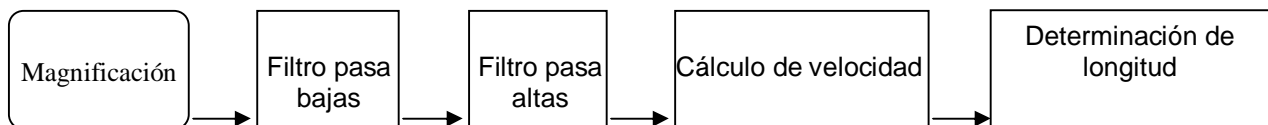


Figura 14. (a) la onda viaja libremente en el interior de la pieza hasta encontrarse con otro material para ser reflejada, la pieza no presenta defectos. (B) la onda es reflejada por el defecto en el interior de la pieza.

A partir del análisis y procesamiento de los datos recolectados en campo, se procedió a determinar la velocidad de onda de onda longitudinal "P", mediante el análisis y lectura de las curvas de velocidad grabadas digitalmente, para lo que se utilizó la paquetería PIT-W de Pile Dynamics Inc., que permite recuperar el registro en pantalla, determinar con mucha precisión la velocidad de onda, así como frecuencias y amortiguamientos de las diferentes ondículas, al igual que la longitud de las pilas analizadas.

Los pasos a seguir para el procesamiento de los datos es el siguiente:

- La señal obtenida en campo se mejora mediante la magnificación de la misma.
- Posteriormente se aplica de un filtro pasabajas, con el que se reduce el ruido generado por la vibración de los armados y otros factores de alta frecuencia.
- A continuación se aplica un filtro pasa altas para eliminar los efectos generados por la fricción del suelo encajonante.
- El siguiente paso es ubicar los tiempos de arribo de la señal a los diferentes sensores con el fin de obtener la velocidad de onda longitudinal del concreto.
- Para finalizar con el procesamiento se ubico el tiempo de arribo de la reflexión de punta, con el fin de establecer a longitud de la pila.



La técnica de velocidad sísmica se emplea como medio para el control de calidad de productos que se presupone están hechos de concreto similar. Tanto la falta de compactación como los cambios en la relación agua/cemento se detectan fácilmente.



## 4. RESULTADOS

A continuación se muestran las curvas de velocidad más representativas de la instrumentación, además de la ubicación de cada pila instrumentada así como los resultados obtenidos con la estadística realizada de todos los datos registrados en campo.

### 4.1 Pila de cimentación 1

La ubicación de la pila 1 se puede observar en la figura 15 por medio de un círculo rojo relleno con el mismo color.

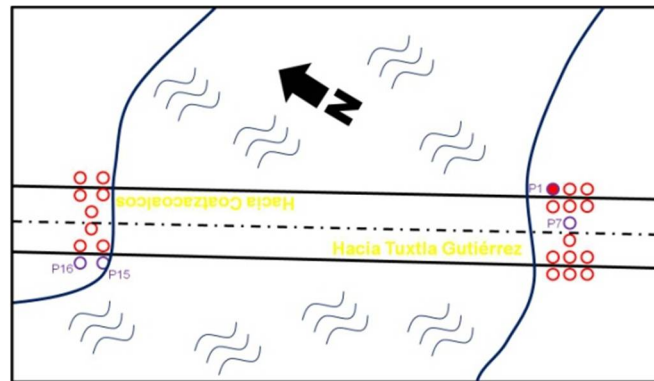


Figura 15. Croquis de ubicación de la pila 1.

### Descripción

En la figura 16 se puede apreciar el velocigrama correspondiente a la pila 1 con las siguientes características:

- 1.- Se observan dos curvas, una de color negro y otra de color azul. Esta característica es indicativa de que se trata de un registro con dos acelerógrafos. La curva de color negro corresponde al acelerógrafo superior, mientras que la curva azul corresponde al inferior.
- 2.- En la curva negra se puede observar un primer impulso positivo, el que corresponde con el pulso inicial que da origen a la curva; el siguiente pulso negativo corresponde con el retorno al estado inicial.
- 3.- En la curva azul es posible observar el mismo comportamiento con un cierto desfase de tiempo. La diferencia en tiempo de arribo de estas dos crestas, en conjunto con la distancia conocida que existe entre sensores permite computar la



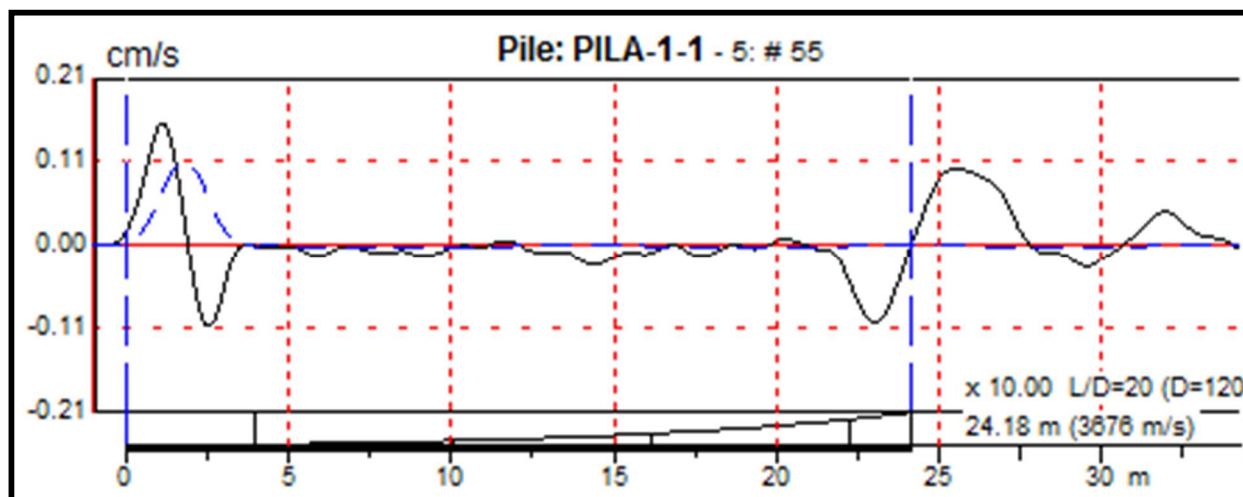
velocidad de propagación de onda compresiva del concreto, la que se calculó de **3,676 m/s**.

4.- Posteriormente se observan diversas crestas y valles de poca energía, las que pueden ser relacionadas a pequeñas variaciones en la sección transversal de la pila o bien, a variaciones de resistencia de los materiales encajonantes.

5.- Posteriormente, sobre la curva negra y a aproximadamente **22 m**, es posible observar un valle de gran magnitud, asociado a un ensanchamiento de la pila o al contacto con un estrato de alta resistencia.

6.- Inmediatamente, en la curva negra, se observa una cresta de importancia, la se asocia con la reflexión de punta. La reflexión de punta indica una profundidad de desplante entre **24 m y 24.50 m**, medidos desde el punto donde se colocó el sensor, el que se localizaba a 22 m del cabezal de la pila, los que dan una longitud total de pila entre **46 y 46.5 m**.

7.- Es importante hacer notar, que la magnificación de la señal sólo se aplica a la curva del primer acelerógrafo, por cuestiones del programa de procesamiento, por lo que no es posible observar la reflexión de punta en el registro del segundo, ya que no se le aplicó este proceso.



## Interpretación

A partir del análisis de los registros, la velocidad calculada se asocia a concretos de buena calidad, ligeramente alterados por la misma antigüedad del puente, los que se

pueden considerar con una resistencia mayor a  $200 \text{ kg/cm}^2$ .

Entre el impulso inicial y la reflexión de punta, no se observan valles o crestas que indiquen reflexiones intermedias de amplitud considerable, por lo que se puede considerar que la pila no presenta defectos importantes que pudieran poner en riesgo la integridad y/o funcionalidad de la misma.

#### **4.2 Pila de cimentación 7**

La ubicación de la pila 7 se puede observar en la figura 17 por medio de un círculo rojo relleno con el mismo color.

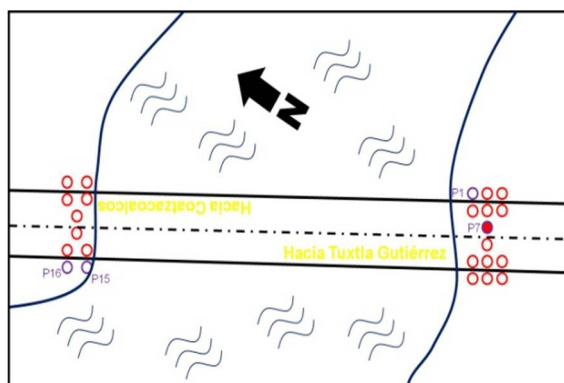


Figura 17. Croquis de ubicación de la pila 7.

#### **Descripción**

La figura 18 corresponde con el velocigrama representativo de la pila 7, el que presenta las siguientes características:

- 1.-Se pueden observar dos curvas, una de color negro y otra de color azul, lo que indica que se trata de un registro de dos acelerógrafos. La curva de color negro corresponde al acelerógrafo superior, mientras que la curva azul corresponde al inferior.
- 2.- La curva negra presenta un primer impulso positivo, el que corresponde con el pulso inicial que da origen a la curva; inmediatamente se observa un pulso negativo, el que se asocia con el retorno al estado de reposo de la partícula.
- 3.-De la misma forma, es posible observar en la curva azul un comportamiento similar con un cierto desfaseamiento de tiempo. Considerando esta diferencia en tiempo, y dado que se conoce la distancia existente entre sensores, es posible computar la velocidad

de propagación de onda compresiva del concreto, la que se calculó de **3,841 m/s**.

4.- En la curva negra, posterior al impulso inicial, se observan diversas crestas y valles de poca magnitud, las que pueden ser relacionadas a pequeñas variaciones en la sección transversal de la pila, o bien, a variaciones de resistencia de los materiales que conforman el subsuelo encajonante.

5.- Posteriormente, siguiendo la curva negra y a aproximadamente **20 m**, es posible observar un valle de gran magnitud, él que se asocia a un ensanchamiento de la pila o al contacto de la estructura con materiales altamente resistentes.

6.- Inmediatamente y en la curva negra, se observa una cresta sobresaliente, la se asocia con la reflexión de punta. La reflexión de punta permite calcular una profundidad de desplante entre **23 m y 23.50 m**, medidos desde el punto donde se colocó el sensor, el que se localizaba a 19 m del cabezal de la pila, los que sumados a la medición realizada, resultan en una longitud total de pila entre **42 y 42.5 m**.

7.- Es necesario comentar, que debido a cuestiones del programa con el que se realiza el procesamiento de la señal, la magnificación sólo se aplica a la curva del primer acelerógrafo, debido a que considera la segunda curva como auxiliar. Debido a esta forma de realizar el proceso, no es posible observar la reflexión de punta en la curva del segundo sensor.

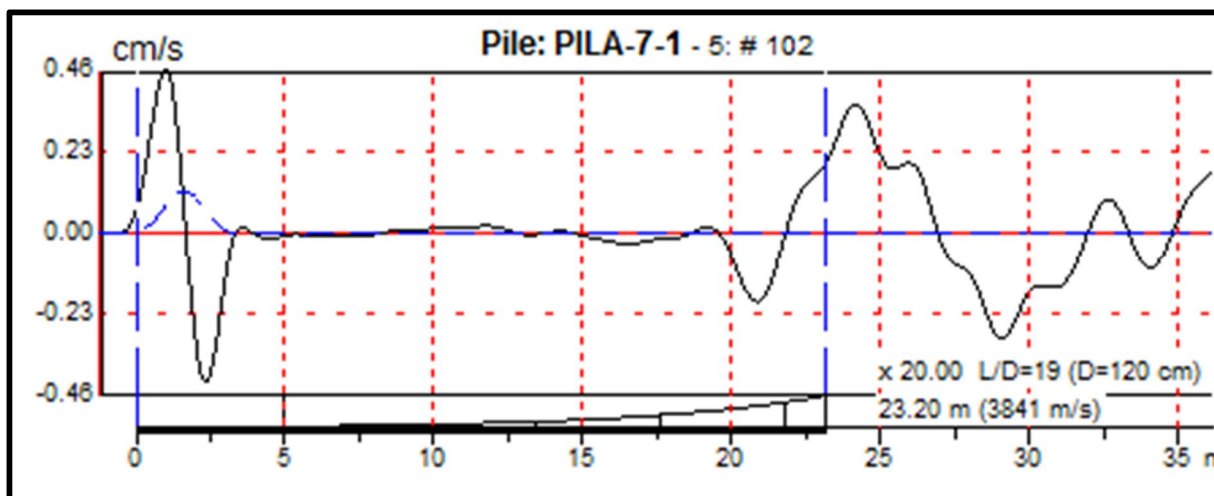


Figura 18. Velocigrama correspondiente a la pila 7.

## Interpretación

La velocidad calculada a partir del análisis de los registros, se asocia a concretos de buena calidad, ligeramente alterados por la antigüedad del puente, con una resistencia estimada mayor a  $200 \text{ kg/cm}^2$ . No se observan reflexiones intermedias entre el impulso inicial y la reflexión de punta, por lo que se puede considerar que la pila no presenta defectos importantes que pudieran poner en riesgo la integridad y/o funcionalidad de la misma.

### 4.3 Pila de cimentación 15

La ubicación de la pila 15 se puede observar en la figura 19 por medio de un círculo rojo relleno con el mismo color.

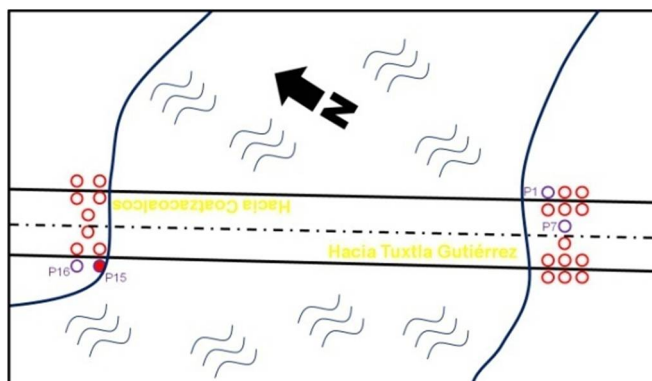


Figura 19. Croquis de ubicación de la pila 15.

## Descripción

Las características que se observan en el registro correspondiente a la pila 15, plasmado en la figura 20, son las siguientes:

- 1.- Se observa un registro de dos acelerógrafos, identificable por la presencia de dos curvas. La primera, de color negro, corresponde al acelerógrafo superior, mientras que la curva azul corresponde al inferior.
- 2.- En la curva negra se observa un primer impulso positivo, el que corresponde con el pulso inicial que da origen a la curva; el pulso negativo que le sigue corresponde con el retorno al estado de reposo.
- 3.- En la curva azul se observa el mismo comportamiento con un cierto desfaseamiento de tiempo. El desfase de estas dos crestas corresponde con la diferencia de tiempo de

arribo de la onda compresiva entre sensores. Este parámetro, en conjunto con el de la distancia que existe entre sensores permite computar la velocidad de propagación de onda compresiva del concreto, la que se calculó de **3,974 m/s**.

4.- Posterior al impulso antes descrito, se observan diversas crestas y valles menores, las que pueden ser relacionadas a pequeñas variaciones en la sección transversal de la pila o bien a variaciones de resistencia de los materiales encajonantes.

5.- Posteriormente, sobre la curva negra y a aproximadamente **25 m**, es posible observar un valle de gran magnitud, asociado a un ensanchamiento de la pila o al contacto con un estrato de alta resistencia.

6.-De acuerdo con la escala del registro, a una profundidad de **27.89 m** se observa una cresta de importancia, la se asocia con la reflexión de punta. La reflexión de punta indica una profundidad de desplante entre **27.5 m y 28 m**, medidos desde el punto donde se colocó el sensor, el que se localizaba a 16.5 m del cabezal de la pila, los que sumados dan una longitud total de pila entre **44 y 44.5 m**.

7.- Debido a que el programa utilizado para el procesamiento de estas señales sólo permite aplicar la magnificación a la curva del primer sensor, en la curva azul no es posible identificar la reflexión de punta.

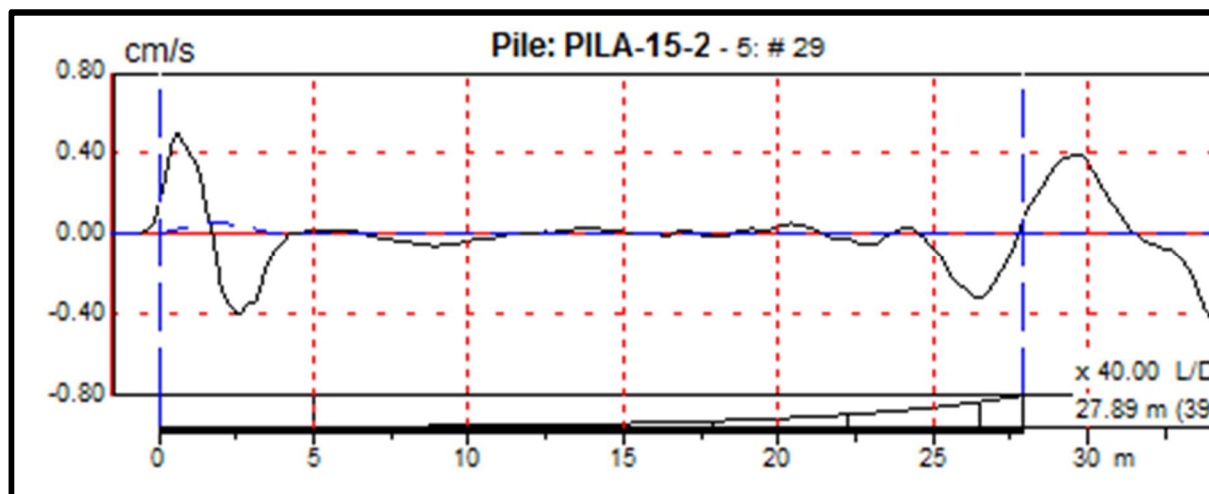


Figura 20. Velocigrama correspondiente a la pila 15.

## Interpretación

La velocidad registrada se asocia a concretos de buena calidad, ligeramente alterados por la antigüedad del puente, con una resistencia mayor a  $200 \text{ kg/cm}^2$ . No se observan reflexiones intermedias entre el impulso inicial y la reflexión de punta, por lo que se puede

considerar que la pila no presenta defectos importantes que pudieran poner en riesgo la integridad funcional de la misma.

#### 4.4 Pila de cimentación 16

La ubicación de la pila 16 se puede observar en la figura 21 por medio de un círculo rojo relleno con el mismo color.

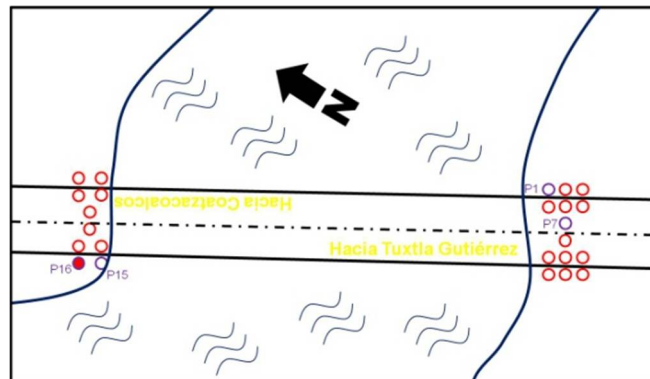


Figura 21. Croquis de ubicación de la pila 16.

#### Descripción

La figura 22 presenta el velocigrama correspondiente a la pila 16, del que se desprenden las siguientes notas:

- 1.- El registro pertenece a una prueba de ecopulso convencional, hecha con un sólo acelerógrafo.
- 2.- En el registro se puede observar un primer impulso positivo, el que corresponde con el pulso inicial que da origen a la curva; el siguiente pulso negativo corresponde con el retorno al estado inicial.
- 3.- Posteriormente se observan diversas crestas y valles de poca energía, las que pueden ser relacionadas a pequeñas variaciones en la sección transversal de la pila o bien a variaciones de resistencia de los materiales que conforman el subsuelo del sitio.
- 4.- Posteriormente, a aproximadamente **15.5 m**, es posible observar un valle de gran magnitud, asociado a un ensanchamiento de la pila o al contacto con un estrato de alta resistencia.

5.- Inmediatamente se observa una cresta de importancia, la se asocia con la reflexión de punta. La reflexión de punta indica una profundidad de desplante entre **18 m y 18.5 m**, medidos desde el punto donde se colocó el sensor, el que se localizaba a 15 m del cabezal de la pila, los que sumados dan una longitud total de pila entre **33 y 33.5 m**.

6.- Es importante aclarar que debido a que los registros de dos sensores, en lo que respecta a la reflexión de punta, no son concluyentes, sólo se usaron para el computo de la velocidad del concreto, la que se calculó de **3908 m/s**.

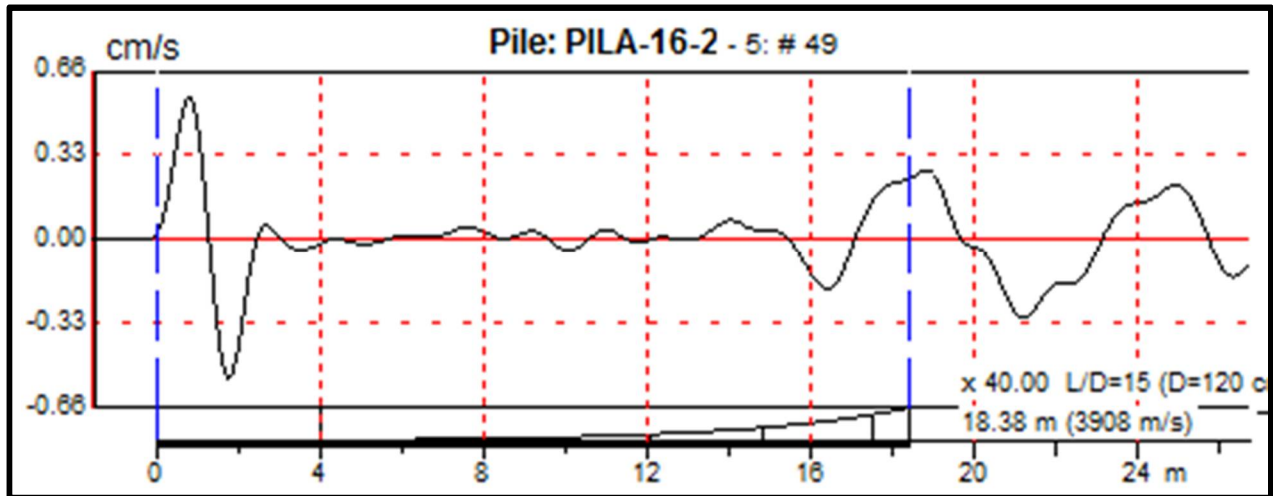


Figura 22. Velocigrama correspondiente a la pila 16.

### Interpretación

La velocidad calculada se asocia a concretos de buena calidad, ligeramente alterados por la antigüedad del puente, con una resistencia estimada mayor a  $200 \text{ kg/cm}^2$ . No se observan reflexiones intermedias entre el impulso inicial y la reflexión de punta, por lo que se puede considerar que la pila no presenta defectos importantes que pudieran poner en riesgo la integridad funcionalidad de la misma.

La tabla 2 resume los resultados obtenidos del procesamiento de los cuatro velocigramas.

número de pila	Velocidad calculada (m/s)	Profundidad de desplante (m)	Distancia del cabezal al sensor (m)	Longitud total de la pila (m)
1	3676	24 - 24.5	22	46 - 46.5
2	3841	23 - 23.5	19	42 - 42.5
3	3974	27.5 - 28	16.5	44 - 44.5
4	3908	18 - 18.5	15	33 - 33.5

Tabla 2. Tabla de resultados obtenidos de las pruebas aplicadas a las cuatro pilas.



## 5. CONCLUSIONES

A partir del análisis de los registros sísmicos recolectados y la confrontación de los resultados de espesores y velocidades derivados de ellos con los propuestos por diferentes agrupaciones de la Industria de la construcción, se desprenden las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Las velocidades menores a 2000 m/s indican concretos pobres de mala calidad, fácilmente deleznable ante el empuje de fuerzas actuantes. Este rango de velocidades no se detectó en ningún pilote del puente.
- La distribución de velocidades longitudinales varía de manera general de 3600 m/s a 3900 m/s, lo que indica velocidades asociadas a concretos de buena calidad, en los cuatro pilotes instrumentados.
- Para la zona de las pilas que sustentan el apoyo en la margen sur de la cuenca se encontró profundidad de desplante entre 23 m y 25 m, medidos desde el punto donde se colocaron los sensores. Dichas profundidades, sumadas a la longitud de pila medida desde la cabeza de la misma hasta el lugar donde se colocaron los sensores indican que las pilas de esta margen tienen entre 42 m y 47 m de longitud total.
- En lo que corresponde a las pilas analizadas de la cimentación del apoyo de la margen norte, se registraron profundidades de desplante entre 18 m y 28 m, medidos desde el punto donde se colocaron los sensores. Dichas profundidades, sumadas a la longitud de pila medida desde la cabeza de la misma hasta el lugar donde se colocaron los sensores indican que las pilas de esta margen tienen entre 33 m y 44 m de longitud total.
- Por último, con base en los resultados obtenidos, las pilas se reportan en buen estado de integridad, con valores de velocidad asociadas a concretos de buena calidad y de longitud aceptable de acuerdo con el tamaño de la estructura que soportan, además que se puede asociar la reflexión negativa previa a la de punta, a un ensanchamiento del fuste de la pila o al desplante de esta sobre materiales de alta resistencia, ambas condiciones favorables para el buen funcionamiento del elemento estructural.



## BIBLIOGRAFÍA

Ambrosini, D. & Ezeberry, J. **Long Piles Integrity Trough Impact Echo Technique**. Mecanica Computacional, XXIV, pp.651–669. Argentina, 2005.

- ASTM; **D 5882-07 Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations**; ASTM internacional; USA, 2007.

- Bermúdez Deana, Angie Luisana; **Aplicación de las pruebas no destructivas PIT y CSL en la evaluación de integridad de pilotes**; Universidad Simón Bolívar; Sartenejas Venezuela, 2005.

- Carcaño, R., Moreno, E. & Pak, W. **Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados**. Ingeniería Revista Académica, 2, pp.41–52. México, 2004.

- Carino, N. J.; **Nondestructive Testing of Concrete: History and Challenges**; ACI SP-144, Concrete technology, P. K. Mehta, ed; American Concrete Institute, Detroit, MI, USA, 1994.

- Hussein, M. H. & Goble G. G.; **A Brief History of the Application of Stress-Wave Theory to Piles**; Current Practices and Future Trends in Deep Foundations, Geotechnical Special Publication No. 125; pp 186-201; Eds, American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 2004.

- Hussein, M., Likins, G. & Goble, G. **Determination of Pile Lengths under Existing Structures**; Proceedings of the 17th Annual Members Conference of the Deep Foundations Institute; Deep Foundations Institute; USA, 1992.

- Massoudi, N. & Teferra, W.; **Non-destructive testing of piles using the low strain integrity method**; Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering; New York, NY, USA; 2004.

- Paikowsky, S. & Chernauskas, L.; **Review of Deep Foundations Integrity Testing Methods and case Histories**; BSCES Geo Institute Deep Foundations Seminar; BSCES Geo Institute; Boston, USA, 2003

- Paniagua, W., Martínez, A. & Ibarra, E; **Discontinuidades e irregularidades en pilas, detectadas con pruebas de integridad**; XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería geotécnica; Guerrero, México; 2010.

- Pile Dynamics Inc.; ***Pile Integrity Tester, User Guide***; Cleveland, USA; 2005.
  - Rausche, F.; ***Non-destructive evaluation of deep foundations***; Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering; New York, NY, USA; 2004.
  - Rausche, F., Hussain, M. & Bixler, M. ***Non-Destructive Testing To Determine Unknown Pile Lengths Under Existing Bridges***. First International Conference on Scour of Foundations; Texas Transportation Institute, College Station; Texas, USA, 2004.
  - Rausche, F., Likins, G. & Shen, R.; ***Pile integrity testing and analysis***; Application of Stress-Wave Theory to Piles; Balkema; Rotterdam, Holanda; 1992.
- Rausche, F., Likinsz, G. & Hussein, M., 1988. ***Pile Integrity By Low And High Strain Impacts***. Proceedings of the 3rd International Conference on Application of Stress-Wave Theory to Piles; pp 44-55; Ottawa, Canada, 1988.
- Rausche, F., Shen R. & Likinsz, G.; ***A comparison of pulse echo and transient response pile integrity test methods***; 70th Annual Transportation Research Board Meeting; Washington D.C., USA; 1991.
  - Santos de la Cruz, E, Cancino, N., Yenque, J., Ramírez, D. & Palomino, M.; ***El ultrasonido y su aplicación***; Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial,, vol. 8, UNMSM, Lima, Perú; 2005
  - Schellingerhout, A. & Muller, T.; ***Detection Limits of Integrity Testing***; Proceedings of the 5th International Conference of Application Stress-Wave Theory to Piles; pp. 960-964; Orlando, Florida, USA; 2006.
  - Solís Carcaño, R. G.; ***Predicción de la Resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados***; Ingeniería revista académica, vol 8, núm. 002; Mérida, México; 2004
  - Telford, W. M., Geldart, L. & Sherift, R.; ***Applied Geophysics***; Cambridge University Press; Segunda edición; NY, USA; 1990.