

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias en Ingenierías

Desarrollo de un método para obtener tomografía en
hormigón utilizando el método de impacto-eco
Trabajo de Investigación

Sebastián Antonio Granda Hervas

Ingeniería Civil

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 14 de mayo de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIA E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Desarrollo de un método para obtener tomografía en hormigón utilizando el
método de impacto-eco

Sebastián Antonio Granda Hervas

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico:

Juan José Recalde, Ph. D.

Firma del profesor:

Quito, 14 de mayo de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Sebastián Antonio Granda Hervas

Código: 00116312

Cédula de Identidad: 1717413841

Lugar y fecha: Quito, 14 de mayo de 2019

RESUMEN

El método de impacto eco es un ensayo no destructivo que a través de ondas de esfuerzo y análisis de ondas se puede medir espesores de losas, detectar vacíos y fallas dentro del hormigón. Actualmente existen dispositivos que a través del impacto eco o pulso eco pueden generar tomografías en 3 dimensiones, sin embargo, su precio actual es sumamente elevado. El presente trabajo de titulación es un proyecto de investigación exploratorio, cuyo objetivo es desarrollar una metodología con ondas ultrasónicas en el hormigón para obtener una imagen de tomografía de dos dimensiones utilizando el método de impacto eco, y explorar la posibilidad de obtener una tomografía tridimensional utilizando equipos básicos como un acelerómetro y un osciloscopio. El trabajo consistió en cinco fases exploratorias. En la Fase 1 se exploró el método de impacto eco en un espécimen de hormigón de 40 x 40 x 20 cm, en el cual se obtuvieron señales, se desarrolló un programa para calcular profundidad de rebote de onda; el programa desarrollado procesó adecuadamente la señal, sin embargo, las profundidades obtenidas no fueron confiables. En la Fase 2 se exploró el método de pulso-eco con ondas P; se logró calcular las profundidades, sin embargo, los valores no correspondieron con las dimensiones del espécimen. En la Fase 3 se realizaron ensayos en una losa de contrapiso, y se determinó que la frecuencia de muestreo fue insuficiente, por lo que en la Fase 4 se incrementó la frecuencia y se obtuvo una profundidad de la losa según lo esperado, e imágenes tomográficas bidimensionales confiables. Finalmente, en la Fase 5, se exploró la obtención de una tomografía tridimensional, lo cual se obtuvo de manera confiable. La configuración adecuada para obtener tomografías utilizando el método de impacto-eco en una losa de contrapiso de alrededor de 10 cm de espesor fue: impactador de acero entre 5 y 10 mm de diámetro, un osciloscopio con frecuencias de muestreo entre 200 y 500 kHz, 2048 puntos de muestra, y un acelerómetro de alta sensibilidad. Los programas desarrollados en Matlab procesan imágenes tomográficas en un punto para detectar profundidad, en una línea de puntos generando una imagen tomográfica bidimensional, y en un arreglo matricial de puntos generando una imagen tomográfica tridimensional.

ABSTRACT

The impact echo method is a non-destructive test that, through stress waves and wave analysis, can measure slab thickness, detect voids and faults inside the concrete. Currently there are devices that through the impact echo or pulse echo can generate a tomography in 3 dimensions, however, its current price is extremely high. The present work is an exploratory research project, whose objective is to develop a methodology with ultrasonic waves in the concrete to obtain a two-dimensional tomography image using the impact echo method, and to explore the possibility of obtaining a three-dimensional tomography using basic equipment such as an accelerometer and an oscilloscope. The work consisted of five exploratory phases. In Phase 1, the impact echo method was explored in a concrete specimen of 40 x 40 x 20 cm, in which signals were obtained, a program was developed to calculate wave rebound depth; the developed program processed the signal adequately, however, the depths obtained were not reliable. In Phase 2, the pulse-echo method with P waves was explored; the depths were calculated; however, the values did not correspond to the dimensions of the specimen. In Phase 3, tests were performed on a concrete slab, and it was determined that the sampling frequency was insufficient, so in Phase 4 the frequency was increased, the depth of the slab obtained, and tomographic images were obtained as expected. Finally, in Phase 5, a three-dimensional tomography was explored, which was obtained in a reliable manner. The appropriate configuration to obtain tomographies using the impact-echo method on a concrete slab about 10 cm thick was: steel impactor between 5 and 10 mm in diameter, an oscilloscope with sampling frequencies between 200 and 500 kHz, 2048 sample points, and a high sensitivity accelerometer. The programs were developed in Matlab and process tomographic images in a point to detect depth, in a line of points generating a two-dimensional tomographic image, and in a matrix array of points generating a three-dimensional tomographic image.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	10
1.1 Antecedentes.....	10
1.2 Justificación	10
1.3 Objetivos.....	11
1.4 Resultados Esperados.....	11
1.5 Actividades	11
1.6 Definiciones.....	12
2. Desarrollo del Tema	13
2.1 Revisión de Literatura	13
2.1.1 Ensayos no destructivos en hormigón	13
2.1.2 Teoría de propagación de ondas de esfuerzo.....	16
2.1.3 Velocidades de ondas de esfuerzo.....	17
2.1.3.1 Velocidad de onda P.....	17
2.1.3.2 Velocidad de onda S.....	18
2.1.4 Impacto-eco.....	18
2.1.4.1 Generalidades.....	18
2.4.1.2 Parámetros para la adquisición de datos	21
2.4.1.3 Tiempo de Contacto.....	21
2.1.5 Pulso Eco	22
2.1.6 Tomografía en Hormigón	23
2.1.7 Análisis de Señal (Transformada Rápida de Fourier)	24
2.2 Fase 1: Obtención de una profundidad mediante impacto eco.....	25
2.2.1 Materiales y Configuración.....	25
2.2.2 Metodología	27
2.2.3 Resultados	27
2.2.4 Análisis de resultados.....	31
2.3 Fase 2: obtención de profundidad mediante el método de pulso eco	32
2.3.1 Materiales y Configuración.....	33
2.3.2 Metodología	34
2.3.3 Resultados	35
2.3.4 Análisis de resultados.....	37
2.4 Fase 3: Profundidad de una losa de contrapiso mediante el método de impacto eco	38
2.4.1 Materiales y Configuración.....	38
2.4.2 Metodología	39
2.4.3 Resultados	39
2.4.4 Análisis de resultados.....	41
2.5 Fase 4: Obtención de profundidad de losa de contrapiso mediante el método de impacto eco a altas frecuencias	42
2.5.1 Materiales y Configuración.....	42
2.5.2 Metodología	44
2.5.3 Resultados	45
2.5.4 Análisis de resultados.....	48

2.6 Fase 5: Obtención de una tomografía en 3D utilizando el método de impacto eco..	48
2.6.1 Materiales y Configuración.....	49
2.6.2 Metodología	49
2.6.3 Resultados	49
2.6.4 Análisis de Resultados.....	52
3. Conclusiones.....	53
3.1 Conclusiones.....	53
3.2 Recomendaciones	54
4. BIBLIOGRAFÍA.....	56
<i>Anexo A: PROGRAMA EN MATLAB PARA PROCESAR UNA SEÑAL - FASE 1</i>	<i>57</i>
<i>Anexo B: PROGRAMA MATLAB – FASE 2</i>	<i>59</i>
<i>Anexo C: PROGRAMA PROCESAMIENTO VARIAS SEÑALES PARA OBTENER TOMOGRAFIA EN 2D MATLAB – FASE 3 Y FASE 4.....</i>	<i>60</i>
<i>Anexo D: PROGRAMA PROCESAMIENTO VARIAS SEÑALES PARA OBTENER TOMOGRAFIA EN 3D MATLAB</i>	<i>62</i>
<i>Anexo F: TOMOGRAFIAS EN 2D OBTENIDAS DE LA FASE 5</i>	<i>65</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 . Resumen de métodos de ensayos no destructivos (ACI-228.2R, 2013).....	14
Tabla 1 . Resumen de métodos de ensayos no destructivos (cont.).....	16
Tabla 2. Parámetros Fase 1 – Experimento 1	26
Tabla 3. Profundidades calculadas para el pico máximo del espectro de frecuencias con la ecuación (3) – Velocidad de onda: 3650 m/s (esfera 5mm).....	30
Tabla 4. Profundidades calculadas para el pico máximo del espectro de frecuencias con la ecuación (3) – Velocidad de onda: 3650 m/s (esfera 10mm).....	30
Tabla 5. Resumen datos obtenidos fase 2 para todas las señales.....	36
Tabla 6. Parámetros Fase 2	38
Tabla 7. Parámetros Fase 3 – Esfera de 5mm.....	43
Tabla 8. Parámetros Fase 3 – Esfera de 10mm.....	43
Tabla 9. Parámetros utilizados para la fase 5.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Método de impacto eco (ASTM C1383)	19
Figura 2. Forma de onda y Espectro de frecuencias para una prueba válida de impacto eco para una losa de hormigón de 250 mm de espesor (ASTM-C1383,2015).....	20
Figura 3. Configuración equipos.....	26
Figura 4. Forma de onda y espectro de frecuencias (Diámetro esfera 5 mm)	28
Figura 5. Forma de onda y espectro de frecuencias (Diámetro esfera 10 mm)	28
Figura 6. Forma de onda, espectro de frecuencias y tomografía para una señal registrada.....	29
Figura 7. Modos de Vibración de un Elemento Prismático (Carino,2015)	31
Figura 8. Forma de Onda y Espectro de frecuencias hasta 4kHz (Esfera de 5mm)	32
Figura 9. Forma de Onda y Espectro de frecuencias hasta 4kHz (Esfera de 10mm)	32
Figura 10. Configuración y espaciamiento fase 2.....	33
Figura 11. Forma de onda emitida por el transductor y forma de onda registrada por el acelerómetro	35
Figura 12. Figura (8) ampliada	36
Figura 13. Gráfico distancia vs profundidad - Fase 2.....	37
Figura 14. Forma de Onda y Espectro de frecuencias fase 3 (Esfera de 5 mm).....	40
Figura 15. Forma de Onda y Espectro de frecuencias fase 3 (Esfera de 10 mm).....	40
Figura 16. Tomografía para varias señales registradas fase 3 (Esfera 5 mm)	41
Figura 17. Tomografía para varias señales registradas fase 3 (Esfera 10mm)	41
Figura 18. Configuración fase 4 con osciloscopio electrónico	44
Figura 19. Forma de onda y espectro de frecuencias – fs: 200 kHz (Esfera 5mm).....	45
Figura 20. Tomografía para varias señales registradas - fs:200kHz, NFFT 512 (Esfera 5mm)	46
Figura 21. Forma de onda y espectro de frecuencias - fs:500 kHz, NFFT: 2048 (Esfera 5mm)	46
Figura 22. Tomografía para varias señales - fs: 500kHz, NFFT:2048 (Esfera 5mm)	47
Figura 23. Forma de onda y espectro de frecuencias - fs:500 kHz, NFFT: 2048 (esfera 10mm)	47
Figura 24. Tomografía para varias señales - fs:500 kHz, NFFT: 2048 (esfera 10mm).....	48
Figura 25. Plano ASBUILT losa contrapiso	50
Figura 26. Tomografía en 2D mas representativa de la fase 5.....	50
Figura 27. Plano de corte en la tomografía en 3D	51
Figura 28. Tomografía en 3D – losa contrapiso	51

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Los ensayos no destructivos en hormigón son de gran utilidad en la evaluación de infraestructura que pueda tener material deficiente. El método de impacto eco es un tipo de ensayo no destructivo en el que a través de ondas de esfuerzo y análisis de señales se puede detectar fallas en el hormigón, espesores de losa, vacíos dentro de estructuras de hormigón, medir profundidades de fisuras de superficie en hormigón, detectar conductos en estructuras de hormigón post tensado, entre otros. A través de este método se ha podido lograr generar imágenes de estructuras de hormigón para obtener una tomografía en tres dimensiones.

Actualmente existen varias marcas de equipos que realizan tomografías utilizando el método de pulso eco que es similar al método de impacto eco. Comercialmente existen los equipos denominados MIRA, Docter y el Pundit Live Array Pro, que permiten obtener tomografías de elementos de hormigón, y cuyos precios son bastante altos.

1.2 Justificación

Los ensayos no destructivos en el hormigón son bastante importantes en el área de ingeniería civil debido a que nos permiten evaluar estructuras civiles sin dañar la estructura. El método de impacto eco es un ensayo no destructivo que se realiza en una superficie de hormigón o asfalto para de esta manera poder medir profundidades en la capa de hormigón o de asfalto, identificar vacíos dentro de las estructuras, ubicar el acero de refuerzo, medir la profundidad de grietas o fisuras visibles en la estructura, detectar vacíos en los ductos de hormigón post tensado, entre otros. Los equipos que realizan tomografía mediante el uso de ondas de esfuerzo son extremadamente útiles para las evaluaciones, sin embargo, requieren de una inversión alta de parte de los ingenieros forenses para el uso de estos equipos, en valores de varias decenas de miles de dólares. Sería útil para el ingeniero forense contar con una

metodología para poder obtener tomografía de los elementos de hormigón, con equipos básicos a un menor costo.

1.3 Objetivos

Con los antecedentes expuestos, para el presente trabajo de titulación se han planteado los siguientes objetivos:

- a) Desarrollar una metodología con ondas ultrasónicas (impacto-eco) en el hormigón para obtener una imagen de tomografía de dos dimensiones.
- b) Desarrollar un algoritmo que permita procesar datos para obtener una imagen tomográfica
- c) Finalmente explorar la posibilidad de obtener una tomografía en 3D a partir de las imágenes obtenidas anteriormente.

1.4 Resultados Esperados

Los resultados esperados o los entregables del trabajo de titulación son:

- a) Metodología definida (Espaciamiento, Equipo)
- b) Algoritmo para procesar datos y generación de imagen en 2D.
- c) Imágenes tomográficas de especímenes de hormigón.
- d) Resultados preliminares de tomografía en 3D (Nota 1).¹

1.5 Actividades

Para cumplir con los objetivos planteados, se plantearon las siguientes actividades:

- a) Desarrollar algoritmo de procesamiento de una señal de impacto-eco para determinar distancia.
- b) Definir la metodología de toma de datos y análisis.

¹ Nota 1: Dependerá del tiempo disponible tras perfeccionar la obtención de imágenes en 2D

- c) Desarrollar algoritmo que procese varias señales para generar una imagen en 2D
- d) Explorar sets de imágenes en 2D para generar una tomografía en 3D. (Nota 1)

1.6 Definiciones

Para este trabajo de titulación se tiene que estar familiarizado con lo siguientes términos:

Transformada Rápida de Fourier o Fast Fourier Transform (FFT): Es un algoritmo que nos facilita el procesamiento de señales para obtener el espectro de frecuencias.

Onda P o P-wave: Es una onda de esfuerzo que se genera al momento de generar un impacto con la superficie del espécimen y es la onda que se va a medir para poder realizar la tomografía. Esta onda viaja de manera paralela al impacto, es decir con ondas de compresión.

Velocidad de Pulso (C_p): Es la velocidad de la onda P o P-wave, que es medida en el espécimen de hormigón que se va a trabajar.

Método de Impacto Eco: Es un ensayo no destructivo que se realiza en el hormigón para poder identificar fallas dentro del espécimen, medir profundidades, identificar vacíos, identificar acero de refuerzo, entre otros.

2. DESARROLLO DEL TEMA

2.1 Revisión de Literatura

2.1.1 Ensayos no destructivos en hormigón

Según el ACI 228.2R-13, existen varios ensayos no destructivos para evaluar el hormigón. A continuación, se presenta una lista de algunos métodos.

- Inspección visual
- Velocidad de pulso
- Eco ultrasónico
- Impacto eco
- Análisis espectral de ondas de superficie
- Respuesta-impulso
- Eco sónico
- Método de movilidad – Impulso respuesta
- Registro de impedancia
- Registro sónico
- Paralelo sísmico
- Radiometría de transmisión directa para densidad
- Radiometría de retro dispersión para densidad
- Radiografía
- Localización de acero de refuerzo
- Potencial de media celda
- Resistividad del hormigón
- Tomografía infrarroja
- Radar

Los métodos que son más relevantes para este trabajo de titulación se resumen en la Tabla 1

Tabla 1 . Resumen de métodos de ensayos no destructivos (ACI-228.2R, 2013)

Método	Principio
Inspección visual	Observar, clasificar, y documentar la apariencia de las fallas en las superficies expuestas de la estructura
Velocidad de pulso	Se mide el tiempo de recorrido de una onda generada por un pulso ultrasónico sobre una distancia conocida. Determina la condición o uniformidad del concreto.
Eco ultrasónico	Transductor emite un pulso corto de ondas ultrasónicas que se reflejan en el lado opuesto de la muestra o en un defecto interior. Se registra la llegada del pulso y se mide el tiempo total del viaje de la onda. Se utiliza para determinar vacíos, delaminaciones, o para medir los espesores de elementos.
Impacto eco	Un receptor adyacente al punto de impacto monitorea la llegada de las ondas de esfuerzo cuando esta se refleja entre la superficie y el lado opuesto de la placa del miembro o por defectos interiores. El análisis de frecuencias permite la determinación de la distancia hasta el reflector si es que se conoce la velocidad de la onda.
Análisis espectral de ondas de superficie	El impacto se utiliza para generar ondas de superficie y dos receptores monitorean el movimiento de la superficie. El análisis de señales permite la determinación de la velocidad de onda en función de la longitud de onda. El proceso inverso determina la constante elástica de las capas.

Tabla 1. Resumen de métodos de ensayos no destructivos (cont.)

Respuesta-impulso	La superficie de un elemento es golpeada con un martillo y transductores adyacentes miden la respuesta dinámica. El análisis de señales permite determinar características del elemento.
Eco sónico	El impacto con un martillo en una superficie genera ondas de esfuerzo y un receptor monitorea las ondas de esfuerzo reflejadas. El análisis del dominio de tiempo permite determinar el tiempo de recorrido de la onda.
Método de movilidad – Impulso respuesta	La superficie de un elemento es golpeada con un martillo y transductores adyacentes miden la respuesta dinámica. Se utiliza para determinar profundidad de cimentaciones profundas o determinar fisuras.
Registro de impedancia	Esta prueba es similar al eco sónico o la respuesta impulso, sin embargo, el análisis de señal es más complejo.
Registro sónico	Análoga a la prueba de velocidad de pulso ultrasónica, a diferencia de que los transductores se ubican entre tubos llenos de agua fundidos en cimentaciones profundas o perforaciones después de la construcción
Paralelo sísmico	Un receptor se coloca en un hueco adyacente a la cimentación y la cimentación es golpeada con un martillo y se registra la señal. Se utiliza para determinar la profundidad de la cimentación o su uniformidad

Tabla 2 . Resumen de métodos de ensayos no destructivos (cont.)

Radiografía	La intensidad de la energía de la radiación electromagnética que atraviesa un miembro de concreto se registra en una pantalla fotográfica. Se utiliza para determinar el refuerzo y acero pretensado, conductos, vacíos.
Localizado de acero de refuerzo	Es un dispositivo de baja frecuencia que emite un campo magnético a la superficie de la estructura. La presencia del acero de refuerzo altera el campo magnético permitiendo ubicar el acero de refuerzo.
Tomografía infrarroja	La presencia de fallas en el hormigón afecta las propiedades de conducción del calor en el hormigón y los defectos son indicados por cambios de temperatura en la superficie cuando la muestra de hormigón es expuesta a un ambiente controlado. Con esto se puede determinar la distancia a la falla interna.
Radar	Este método es parecido al método ultrasónico eco, a diferencia se utilizan ondas electromagnéticas en vez de ondas de esfuerzo. Se puede determinar espesores, acero de refuerzo, vacíos, y regiones con alto contenido de humedad.

2.1.2 Teoría de propagación de ondas de esfuerzo

Las ondas de esfuerzo ocurren cuando se aplica repentinamente presión o una deformación, como impacto sobre una superficie de un sólido. La onda se propaga a través del sólido de una manera similar de cómo se propaga el sonido en el aire. La velocidad de la onda de esfuerzo en un medio sólido elástico está en función del módulo de Young, relación de Poisson, la densidad, y la geometría del sólido. La dependencia entre las propiedades del sólido

y el comportamiento de la propagación de la onda de esfuerzo resultante permite inferir sobre las características del sólido monitoreando la propagación de la onda de esfuerzo.

Cuando se aplica presión repentinamente en la superficie de un sólido, esta perturbación se propaga en el sólido en tres diferentes ondas: la onda P, la onda S y la onda R. Las ondas S y P se propagan en el sólido como frentes de onda hemisféricos. La onda P también llamada onda de compresión es asociada con la propagación del esfuerzo normal y el movimiento de las partículas es paralelo a la dirección de la propagación. La onda S, también llamada la onda de corte es asociada con esfuerzos cortantes y el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de la propagación. Finalmente, la onda R viaja sobre la superficie debido a la perturbación. (ACI 228.2R-13)

2.1.3 Velocidades de ondas de esfuerzo

2.1.3.1 Velocidad de onda P

La velocidad de propagación de ondas de esfuerzos depende de la densidad y la constante elástica del sólido. En un miembro de hormigón, las variaciones en la densidad muestran que la muestra de hormigón no tuvo una consolidación uniforme, también la variación en las propiedades elásticas puede ocurrir por la variación en los materiales, diferentes proporciones en la mezcla, o el curado. (ACI 228.2R-13)

Para determinar la velocidad de la onda P (C_p) se utiliza la norma ASTM C597-16 que especifica la siguiente ecuación:

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

En donde,

E = Módulo de elasticidad de Young

ν = Proporción de Poisson

ρ = Densidad

2.1.3.2 Velocidad de onda S

La velocidad de la onda S se propaga de manera más lenta a comparación de la onda P y se calcula de la siguiente manera:

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

G = Módulo de cortante

ρ = Densidad

2.1.4 Impacto-eco

2.1.4.1 Generalidades

En los años setentas, el método de impacto, también llamado eco sísmico o eco sónico se utilizaba para evaluar pilas de hormigón. En 1980 el método de impacto eco fue desarrollado para evaluar elementos de hormigón por Sansalone y Carino (Carino, 2015). Las aplicaciones proponían determinar espesores o fallas en elementos estructurales como losas o losas de puentes, vigas, columnas, determinar profundidad de fisuras, y detección de vacíos en vigas de puentes de hormigón post tensado. Este método fue luego estandarizado por la norma ASTM C1383 en donde se propone dos métodos, el primero para medir la velocidad de onda P en un elemento de hormigón y el segundo para medir la profundidad de un elemento tipo placa de hormigón con el método de impacto eco.

El principio de impacto eco es básicamente generar una onda de esfuerzo a través de un sistema mecánico de impacto en la superficie. Las ondas de esfuerzo P y S generadas por el impacto se propagan en el elemento de hormigón y adicionalmente viaja una onda en la superficie conocida como la onda R. La llegada de estas ondas reflectadas o ecos, a la superficie donde se generó el impacto, generan desplazamientos que son medidos por un transductor y se guardan en un sistema de adquisición de datos. La manera más rápida y simple de interpretar estos datos es con análisis de frecuencias de los desplazamientos de las ondas. El principio de análisis de frecuencias es que, las ondas generadas por el impacto producen múltiples

reflexiones en el elemento y estos conforman un modo de vibración resonante de profundidad. La frecuencia de resonancia de esta vibración depende de una velocidad de onda, de la distancia entre la superficie de impacto y la superficie de reflexión. Esta frecuencia se la conoce como la frecuencia de profundidad.

En la Figura 1 se muestra gráficamente cómo se lleva a cabo la metodología de impacto eco, en donde, se ve que se tiene un generador de ondas de esfuerzo, un transductor que es el que registra la onda y esta onda se registra en un dispositivo de adquisición de datos.

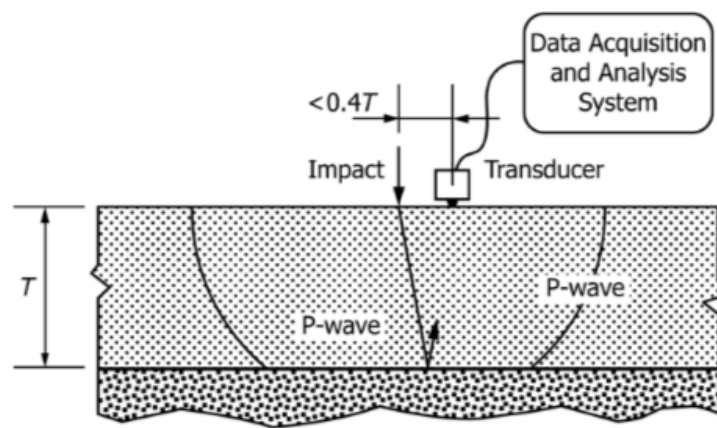


Figura 1. Método de impacto eco (ASTM C1383)

En el análisis de frecuencias, la señal es transformada hacia un dominio de frecuencia usando la rápida transformada de Fourier. La rápida transformada de Fourier requiere trabajar con 2 a la n números de puntos. Es decir, valores típicos de: $N = 2^{10} = 1024$, $N = 2^{11} = 2048$, $N = 2^{12} = 4096$, $N = 2^{13} = 8192$. Como es una función simétrica, se utilizan la mitad de los puntos, es decir, $N/2$ puntos.

El resultado es un espectro de frecuencias que indica la amplitud de todos los componentes de frecuencias del frente de onda, en donde la frecuencia de profundidad es representada por un pico en el espectro de frecuencias. En la Figura 2 se muestra en la imagen izquierda, la señal registrada, y en la imagen de la derecha se muestra el espectro de frecuencias, en donde claramente se observa el pico de la frecuencia de profundidad.

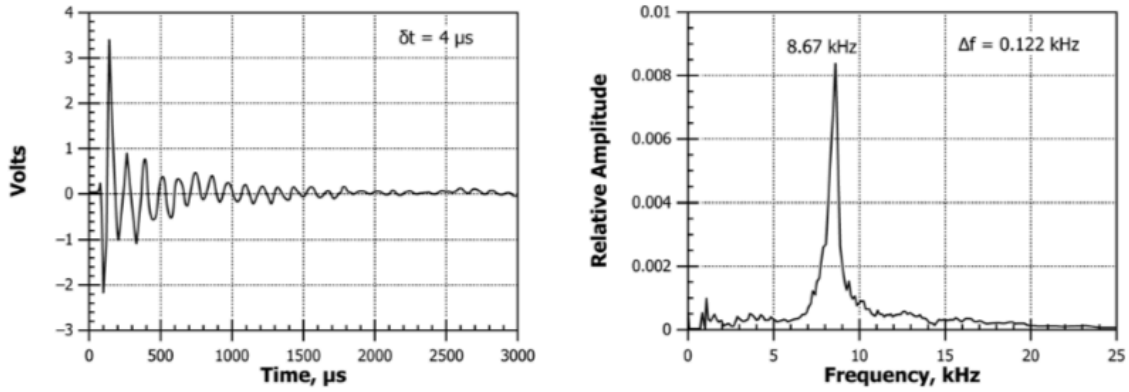


Figura 2. Forma de onda y Espectro de frecuencias para una prueba válida de impacto eco para una losa de hormigón de 250 mm de espesor (ASTM-C1383,2015)

Para una estructura tipo losa la distancia se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{c_p}{2f} \quad (3)$$

En donde,

T = distancia(m)

Cp = Velocidad de onda P (m/s)

f = frecuencia de profundidad (Hz).

En análisis de frecuencias de señales obtenidas en elementos estructurales tipo viga como columnas y vigas de hormigón armado, estribos de puentes o vigas de puentes, o elementos similares es más complicado a comparación de elementos tipo losa. La presencia de los límites laterales da lugar a modos de vibración transversal de la sección analizada. Por esto antes de interpretar los resultados, las características de los modos de vibración transversales deben ser determinados del elemento estructural. Estas frecuencias dependen de la geometría y de las dimensiones de la sección transversal.

De esta manera la norma ASTM C1383 recomienda que para elementos tipo placa las dimensiones laterales deben ser al menos seis veces la profundidad. Estas mínimas dimensiones laterales son requeridas justamente para que la respuesta del impacto sea dominada por las frecuencias resonantes de la profundidad y no de los modos de vibración de la placa.

2.4.1.2 Parámetros para la adquisición de datos

Los elementos clave para obtener un buen espectro de frecuencias son los siguientes:

- Intervalo de muestreo
- Longitud del registro
- Rango del voltaje
- Nivel del disparo

El intervalo de muestreo es el tiempo entre cada punto registrado en el dominio del tiempo de la señal. El inverso del intervalo de tiempo nos da la frecuencia de muestreo, es importante la frecuencia del muestreo debido a que cuando se obtiene el espectro de frecuencias, la máxima frecuencia utilizable es la mitad de la frecuencia de muestreo. La longitud del registro es el número de puntos en el dominio del tiempo de la señal multiplicado por el intervalo del muestreo. La resolución de la frecuencia es el inverso de la longitud del registro en el espectro de frecuencias. En teoría la resolución de la frecuencia debería ser pequeña para aumentar la exactitud de las profundidades calculadas. Estos parámetros son importantes por que afectan el espectro de frecuencias.

El rango de voltaje debe seleccionarse de tal manera que se pueda ver claramente el registro de la señal, para esto se debe igualar el valor del voltaje con el valor máximo de voltaje que va a ser generado por el receptor durante la prueba. El nivel de disparo es usado para indicar cuando se empieza a guardar los datos de la señal, es importante configurarlo para que registre un poco de datos antes de la llegada de la señal, con esto se verifica si es que la señal es válida.

2.4.1.3 Tiempo de Contacto

Uno de los pasos más importantes en el método de impacto eco es seleccionar adecuadamente el tiempo de contacto del impacto. De acuerdo con Carino (Carino, 2015), se ha investigado que una esfera de acero funciona adecuadamente como impactador. El punto clave del tiempo de contacto es el siguiente: para excitar la frecuencia del modo de vibración de la profundidad en una prueba de impacto eco la frecuencia de la profundidad tiene que ser

menor a la frecuencia contenida en el impacto, es decir, la máxima frecuencia utilizable contenida en el impacto tiene que ser mayor a la frecuencia de la profundidad. Por ejemplo, si se asume una velocidad de onda de 4000 m/s y queremos determinar si es que existe algún vacío en una profundidad igual a 75 mm en una pared de hormigón. Con la ecuación (3) se puede calcular la frecuencia de la profundidad de ese vacío de la siguiente manera: $4000/(2*0.0075)= 27$ kHz. El inverso de esta frecuencia es el tiempo de contacto máximo que se puede utilizar para identificar el vacío, que para el caso es 40 microsegundos.

Estudiando el tiempo de contacto Carino demostró que el tiempo de contacto es independiente de la altura de lanzamiento o de la velocidad de la esfera de acero al tiempo de impacto. Con esto, Carino concluyó que el tiempo de contacto teórico se puede calcular multiplicando 4.3 veces el diámetro de la bola en milímetros. (Carino, 2015)

2.1.5 Pulso Eco

La prueba del pulso eco consiste en generar una onda de esfuerzo a través de un transmisor. Este pulso se propaga en el elemento de prueba y las ondas se reflejan en las fallas del elemento o en sus superficies. La llegada de estas ondas en la superficie es monitoreada con el mismo transductor que actúa como receptor. Sin embargo, se ha utilizado un transductor receptor independiente que se lo coloca cerca de el transductor que genera el pulso. Anteriormente se utilizaba la salida de la señal y se graficaba en un osciloscopio en función del tiempo. El tiempo total de ida y vuelta del pulso se puede obtener del gráfico del osciloscopio determinando el tiempo de inicio del pulso hasta que el receptor escucha el pulso. Si es que se conoce la velocidad de onda en el material, se puede utilizar este tiempo para determinar la profundidad de la cara en la que se refleja la onda.

Los transductores utilizados en este método deben ser de al menos 200 kHz, y es considerado una frecuencia baja, debido a que normalmente los transductores utilizados son de 1 MHz. Para calcular la profundidad con este método se utiliza la siguiente ecuación:

$$T = \sqrt{\left(C_s \frac{t}{2}\right)^2 - X^2} \quad (4)$$

En donde,

C_s = Velocidad de la Onda S

2.1.6 Tomografía en Hormigón

Actualmente existen varios equipos que pueden realizar tomografías de hormigón utilizando diferentes metodologías, como es el método de impacto eco, pulso eco, radar, GPR, entre otros. A continuación, se van a nombrar y explicar los equipos que existen y que tecnología utilizan.

MIRA

El tomógrafo MIRA es un dispositivo desarrollado por la compañía Germann Instruments y específicamente permite crear tomografías en tres dimensiones en el hormigón. La tecnología que utiliza es ultrasonido (Pulso eco) y está compuesta por 48 transductores de onda de cortante de punto seco, es decir, que no necesita una cera o líquido que acopla el transductor y el hormigón. Los transductores emiten ondas S o más conocidas como ondas de corte en el hormigón. Cada transductor emite una onda y los demás transductores reciben la onda generada, debido a que se conoce la distancia entre transductor, el tiempo de emisión de la onda y el tiempo de llegada de la onda, se puede calcular la profundidad de la losa de hormigón o de los vacíos conociendo la velocidad de onda. Básicamente el MIRA genera varias imágenes en dos dimensiones y luego estas imágenes son transferidas a un computador que genera la tomografía en tres dimensiones. (Germann-Instruments, 2019)

DOCTER

Germann Instruments igualmente tiene otro dispositivo conocido como Docter que funciona con el método de impacto eco para estructuras de hormigón. A diferencia del MIRA, el Docter es un equipo con un solo transductor que funciona solo con ondas P, para registrar la onda se tiene que impactar el sólido con una esfera de acero y el dispositivo registra la llegada

de la onda, con un software de procesamiento de señales se puede: medir la profundidad de losas, la ubicación de vacíos en estructuras de hormigón. También puede generar imágenes en dos dimensiones y tres dimensiones de los resultados obtenidos a través de un software de procesamiento de imágenes. (Germann-Instruments, Flaw detection Docter, 2019)

Proceq Pundit Live Array Pro

El dispositivo de la compañía Proceq funciona igualmente con ultrasonido (pulso eco), contiene 24 transductores que emiten una onda de cortante. La resolución a la que mide es de un microsegundo y la frecuencia que emiten los transductores es de 50 kHz. Sus aplicaciones son: medición de la profundidad, ubicación de vacíos, ubicación de los defectos del hormigón dentro de los ductos de hormigón post tensado. El rango de medición es menor a 2.5 metros dependiendo de la calidad del hormigón. (Proceq, 2019)

Proceq GPR Live

Este dispositivo de Proceq utiliza ondas electromagnéticas en vez de ondas de esfuerzo. Tiene el espectro de frecuencias más grande del mercado debido a que trabaja en frecuencias de 0.9 – 3 GHz. El rango máximo de profundidad es hasta 70 cm en el hormigón. Sus aplicaciones son: ubicar acero de refuerzo, imágenes en 2D y 3D del acero de refuerzo, medición del espesor de losa, sirve para investigar la superficie del pavimento o de puentes. (Proceq, Portable Ground Penetrating Radar - Proceq GPR Live, 2019)

2.1.7 Análisis de Señal (Transformada Rápida de Fourier)

Las series de Fourier es una descomposición de la función original en una suma infinita de funciones elementales de senos y cosenos con diferentes amplitudes y ángulos de desfase. La ecuación que define la serie de Fourier es la siguiente:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos\left(\frac{2n\pi}{T} t\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T} t\right)] \quad (5)$$

Donde a_0 , a_n y b_n son los coeficientes de Fourier.

Sin embargo, lo que interesa para el análisis de señales es la transformada de Fourier. La transformada de Fourier es una transformación matemática que convierte señales entre el dominio del tiempo y el dominio de frecuencia. La transformada de Fourier es básicamente el espectro de frecuencias de una función, por lo tanto, contiene todas las frecuencias del tiempo durante el cual existió la señal, por esto solo se obtiene un espectro de frecuencias para toda la función. La transformada de Fourier en Matlab está definida con la siguiente función:

$$Y_{k+1} = \sum_{j=0}^{n-1} w^{jk} x_{j+1} \quad (6)$$

En donde, $w = e^{-\frac{2\pi i}{n}}$, i es la unidad imaginaria, y los índices j y k varían en 0 y $n-1$.

(Mathworks, 2019)

Al aplicar la transformada de Fourier se obtiene el espectro de frecuencias que se muestra en la Figura (2).

2.2 Fase 1: Obtención de una profundidad mediante impacto eco

El objetivo de la Fase 1 fue desarrollar una metodología de análisis para obtener profundidad en diferentes puntos de un espécimen utilizando el método de impacto-eco. Para la fase uno se trabajó con una losa de hormigón de 20x40x40cm en donde se utilizó el método de impacto eco para poder determinar la profundidad de la losa y sus defectos, con la finalidad de realizar una tomografía para el espécimen de hormigón. Se desarrolló un programa escrito en Matlab que procesa señales y obtiene distancias. El programa utilizado en esta fase se encuentra en el anexo A.

2.2.1 Materiales y Configuración

Para la Fase 1 se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- Osciloscopio (BK Precision 2530B)
- Acelerómetro
- Esferas de acero (5 mm y 10 mm)
- Acondicionador de señal

- Espécimen de hormigón (20x40x40cm)

Los parámetros para la Fase 1 especificados en la siguiente Tabla 2:

Tabla 3. Parámetros Fase 1 – Experimento 1

Parámetros	Datos
Δt	$8 \mu s$
fs: Frecuencia de muestreo	125 kHz
fmax: 1/2fs	62.5 kHz
NFFT	4096
$NFFT * \Delta t$	32.76 ms
$\Delta f = \frac{1}{NFFT * \Delta t}$	0.0305 kHz

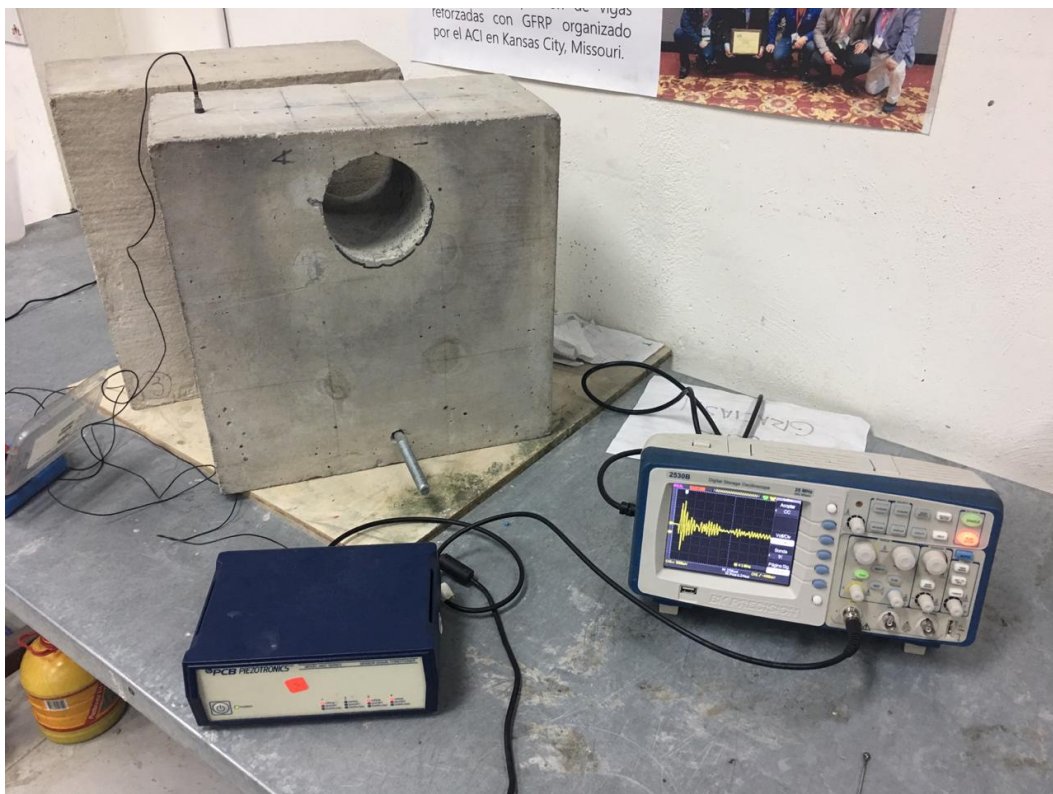


Figura 3. Configuración equipos

2.2.2 Metodología

El método utilizado para la fase uno fue la siguiente:

- Primero se generó una línea en la mitad del espécimen de hormigón en donde se definió que cada 2 cm se iba a tomar los datos.
- Luego se procedió a armar el equipo, primero se conectó el acelerómetro al acondicionador de señal y el acondicionador de señal se lo conecta al osciloscopio como se muestra en al Figura 3. Los datos de la señal se extrajeron del osciloscopio con una memoria del almacenamiento USB. En la figura 3 se muestra una imagen de cómo se conectaron los equipos.
- Luego se coloca el acelerómetro en el primer punto y se lo fija con cera para mejorar el acoplamiento entre el acelerómetro y el espécimen. Después, se impacta la losa con la esfera de acero cerca del acelerómetro para empezar a calibrar el osciloscopio. Se debe calibrar el voltaje del osciloscopio y el nivel de disparo que permita registrar una señal válida según especifica la norma ASTM C1383.
- Una vez que se calibra el osciloscopio, se procede a grabar los datos. Se analiza la señal obtenida con el algoritmo desarrollado que permite procesar señales y si es una señal válida se avanza al siguiente punto de muestreo, si no es válida, se vuelve a tomar otra señal.
- Se repite todos varios los pasos anteriores hasta generar archivos con señales válidas que se ingresaran en un programa de Matlab que va a procesar todas las señales y va a generar una imagen en 2D.

2.2.3 Resultados

El programa registra las señales adquiridas, y las procesa para determinar la profundidad de rebote. En la Figura 3 se muestra una imagen representativa de las señales obtenidas para la fase uno para una esfera de 5 mm y en la Figura 4 la señal obtenida con el

impacto de una esfera de 10 mm, en donde se muestra la señal obtenida por el osciloscopio en el gráfico superior y en color tomate se muestra la parte de la señal que se procesó. En el gráfico inferior se muestra el espectro de frecuencias normalizado hasta 15 kHz.

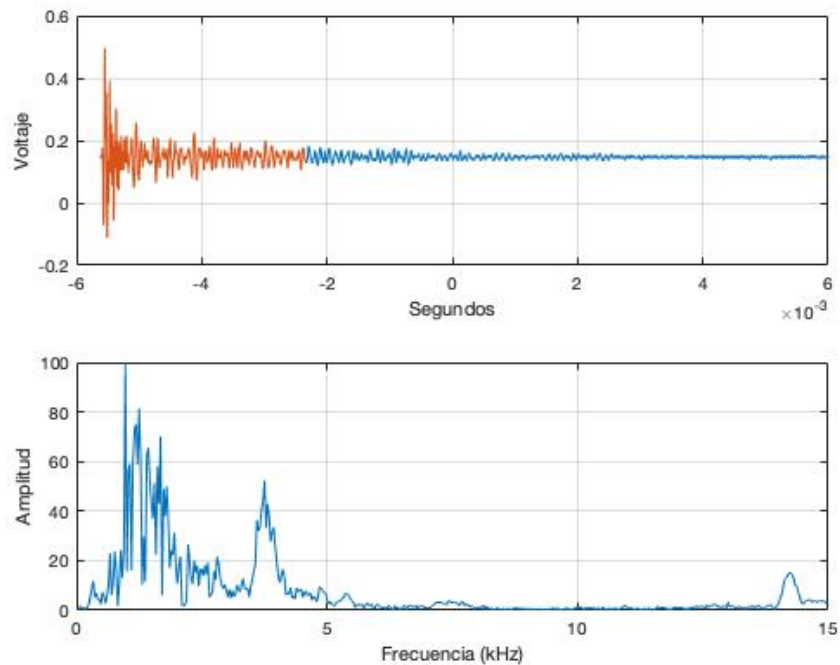


Figura 4. Forma de onda y espectro de frecuencias (Diámetro esfera 5 mm)

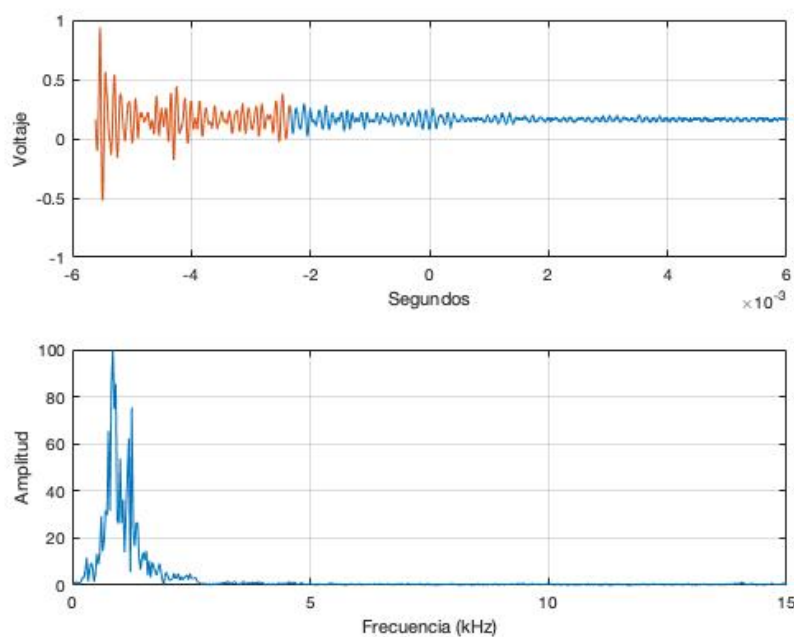


Figura 5. Forma de onda y espectro de frecuencias (Diámetro esfera 10 mm)

A continuación, se muestra los pasos para procesar la señal y obtener una tomografía. Es decir, se registra la señal, se procesa y se obtiene un espectro de frecuencias. Para obtener la tomografía se da un color a cada valor de amplitud del espectro de frecuencias. como se muestra en la Figura 5. La velocidad de onda se obtuvo mediante el ensayo ASTM C597-16.

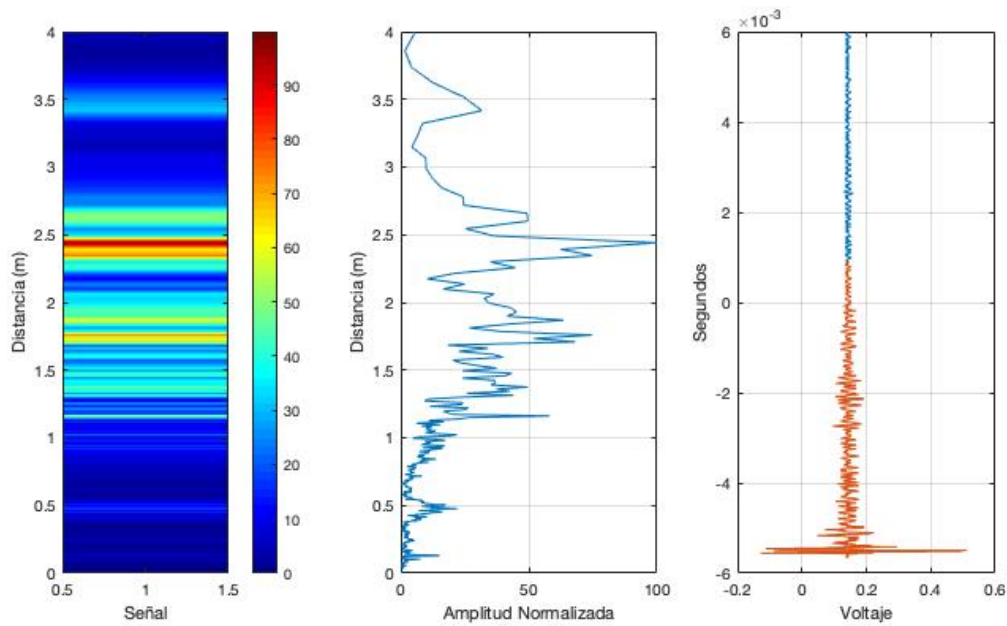


Figura 6. Forma de onda, espectro de frecuencias y tomografía para una señal registrada

Con la metodología desarrollada, se procesaron todas las señales. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos tras procesar cada señal utilizando la esfera de 5 mm de diámetro; y en la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos sobre el mismo espécimen utilizando la esfera de 10 mm.

Tabla 4. Profundidades calculadas para el pico máximo del espectro de frecuencias con la ecuación (3) – Velocidad de onda: 3650 m/s (esfera 5mm)

Señal	Frecuencia de Profundidad (kHz)	Profundidad (m)
1	0.82	2.22
2	1.53	1.19
3	1.07	1.71
4	1.16	1.57
5	1.07	1.71
6	1.25	1.46
7	0.83	2.21
8	0.76	2.40
9	1.34	1.36
10	0.76	2.40
11	1.25	1.46
12	1.25	1.46
13	0.76	2.40
14	0.98	1.87
15	1.25	1.46
PROMEDIO	1.07	1.79

Tabla 5. Profundidades calculadas para el pico máximo del espectro de frecuencias con la ecuación (3) – Velocidad de onda: 3650 m/s (esfera 10mm)

Señal	Frecuencia de Profundidad (kHz)	Profundidad (m)
1	1.49	1.22
2	1.04	1.76
3	1.06	1.72
4	1.16	1.57
5	1.25	1.46
6	0.91	1.99
7	0.83	2.21
8	1.25	1.46
9	1.34	1.36
10	1.25	1.46
11	1.25	1.46
12	1.25	1.46
13	0.76	2.40
14	1.34	1.36
15	0.76	2.40
PROMEDIO	1.13	1.69

2.2.4 Análisis de resultados

Después de analizar ambas señales registradas se pudo concluir que para especímenes con dimensiones laterales menores a seis veces la profundidad es más difícil obtener la frecuencia de profundidad. Según la norma ASTM C1383 como se mencionó anteriormente, limita con dimensiones mínimas a los especímenes de hormigón para que los modos de vibración de la losa de hormigón no entren en el espectro de frecuencias. Según Carino (2015), cuando el elemento entra en resonancia con los modos de vibración se tienen espectros de amplitud como se muestra en la Figura 6. Al comparar con los datos obtenidos para las dos esferas de 5 mm y de 10 mm se puede ver que la forma del espectro de frecuencias es muy similar a la imagen que presenta Carino de un espectro de frecuencias con los modos de vibración del elemento, como se presenta en la Figura 7 y la Figura 8. Por lo tanto, se puede concluir que para el espécimen de losa analizado se está obteniendo las frecuencias de los modos de vibración y no la frecuencia de profundidad del elemento. Por lo que no se logró obtener una tomografía del espécimen.

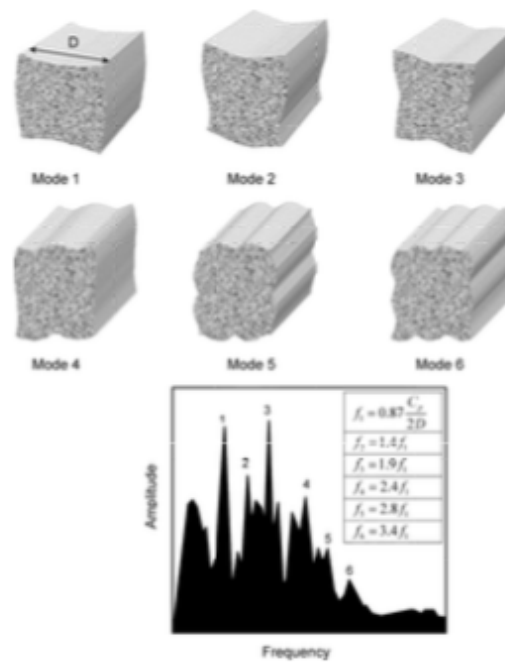


Figura 7. Modos de Vibración de un Elemento Prismático (Carino,2015)

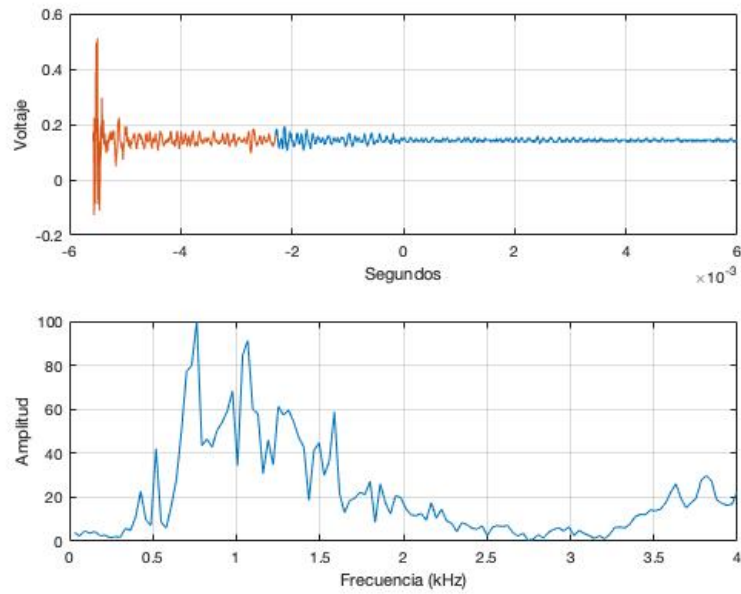


Figura 8. Forma de Onda y Espectro de frecuencias hasta 4kHz (Esfera de 5mm)

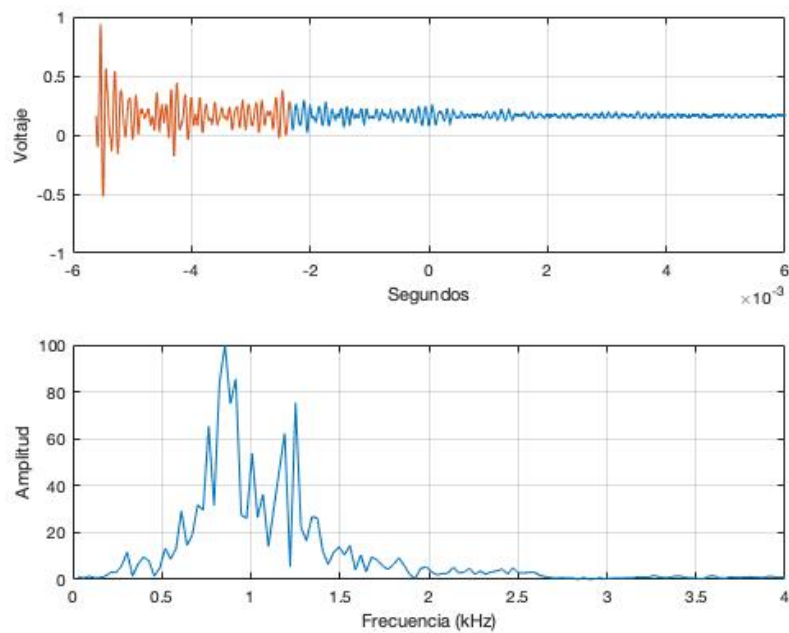


Figura 9. Forma de Onda y Espectro de frecuencias hasta 4kHz (Esfera de 10mm)

2.3 Fase 2: obtención de profundidad mediante el método de pulso eco

El objetivo de la Fase 2 fue explorar el método de pulso eco sobre el mismo espécimen de hormigón utilizado en la Fase 1. Para la Fase 2 se trabajó con la misma losa de

hormigón de 20 x40 x40 cm. Se quiere determinar la profundidad de la losa y sus defectos, con la finalidad de poder realizar una tomografía para el espécimen de hormigón. Se utilizó un programa en Matlab para graficar las curvas obtenidas para poder tener un mejor análisis, que se encuentra en el anexo B.

2.3.1 Materiales y Configuración

Para la fase dos se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- Osciloscopio (BK Precision 2530B)
- Acelerómetro
- Transductor (50 kHz)
- Generador de pulso Proceq
- Acondicionador de señal
- Especimen de hormigón (20cmx40cmx40cm)



Figura 10. Configuración y espaciamento fase 2

2.3.2 Metodología

- Para la fase dos se utilizó en cambio el método de pulso eco explicado anteriormente. En donde primero se conectó el generador de pulso Proceq a el transductor de 50 kHz; el transductor se lo acopla al espécimen mediante un gel con buenas propiedades acústicas. La señal del transductor se conectó en el canal uno del osciloscopio y en el canal dos se conectó el acelerómetro. El acelerómetro primero se conecta a un acondicionador de señal y el acondicionador de señal va conectado al osciloscopio como se muestra en la figura 3.
- Seguido, se definió una línea de muestra en el espécimen de hormigón en donde el transductor va a ser un elemento fijo en la prueba y el acelerómetro se va a ir moviendo de punto en punto cada 2 cm para ir obteniendo las señales emitidas por el transductor.
- El transductor está constantemente generando un pulso de 50 kHz y el acelerómetro va a registrar la llegada de esta señal. Primero se empezó a dos centímetros de separación entre el acelerómetro y el transductor, luego a 4 cm, y así sucesivamente con múltiplos de 2 cm con el transductor fijo en un punto y el acelerómetro alejándose del transductor. En la figura 11 se muestra como se registran las dos señales del transductor y del acelerómetro.
- Se registraron varias señales con el osciloscopio y lo que se mide en este método es el tiempo desde que se inició el pulso y el momento que llegó la onda al acelerómetro. Conociendo la velocidad de onda (C_s), el delta de tiempo Δt y la distancia entre el acelerómetro y el transductor (X) se puede calcular la profundidad de alguna falla en el hormigón o del fondo del espécimen con la ecuación (4).

2.3.3 Resultados

En la Figura 11 y 12 se muestra cómo se visualizan las ondas registradas en el osciloscopio. Las ondas fueron exportadas a un archivo (.csv) y se graficaron en Matlab para poder analizar mejor las señales. Para esta fase se utilizó una velocidad de onda de 3650 m/s y con la ecuación (4) se pudo calcular la profundidad. El programa para procesar los datos se encuentra en el Anexo B, y en la Tabla 5 se resumen los datos obtenidos tras el procesamiento de todas las señales y en la Figura 11 se grafica los resultados de la profundidad versus la distancia del eco.

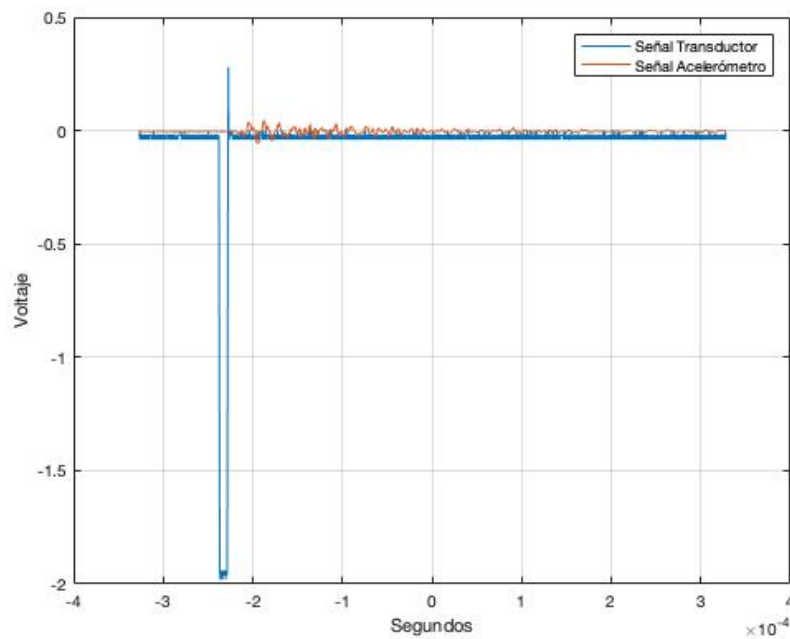


Figura 11. Forma de onda emitida por el transductor y forma de onda registrada por el acelerómetro

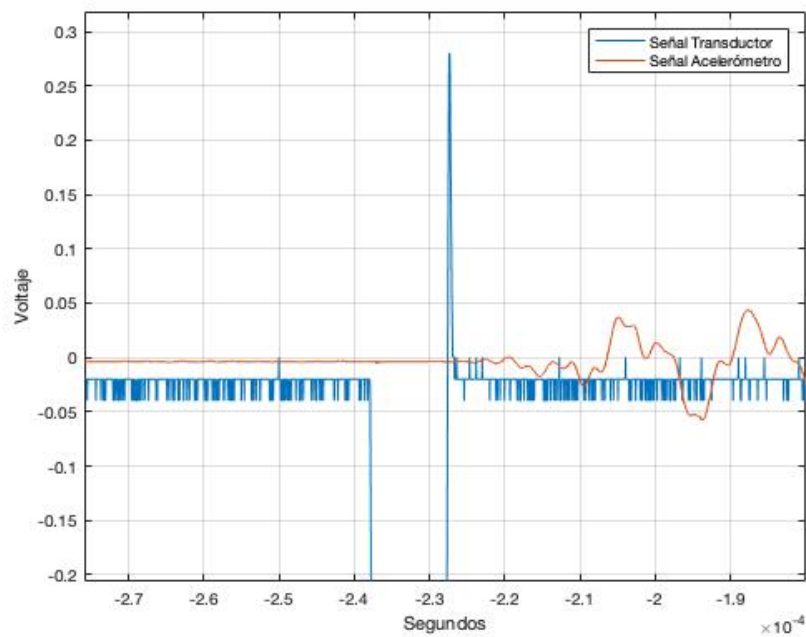


Figura 12. Figura (8) ampliada

Tabla 6. Resumen datos obtenidos fase 2 para todas las señales

Señal	Pulso(t1) [s]	Acelerómetro (t2) [s]	Δt (t2- t1)(s)	D1(cm)	H(cm)
1	-0.00023	-0.0002	0.00003	3.5	5.19
2	-0.00023	-0.00019	0.00004	5	6.86
3	-0.00023	-0.00019	0.00004	6	6.66
4	-0.00023	-0.00018	0.00005	7	8.43
5	-0.00023	-0.00017	0.00006	8	10.19
6	-0.00023	-0.00017	0.00006	9	9.98
7	-0.00023	-0.00016	0.00007	10	11.76
8	-0.00023	-0.00016	0.00007	11	11.53

9	-0.00023	-0.00016	0.00007	12	11.28
10	-0.00023	-0.00015	0.00008	13	13.07
11	-0.00023	-0.00015	0.00008	14	12.81
12	-0.00023	-0.00015	0.00008	15	12.53
13	-0.00023	-0.00014	0.00009	16	14.35
14	-0.00023	-0.00013	0.0001	17	16.15
15	-0.00023	-0.00013	0.0001	18	15.88
16	-0.00023	-0.0001	0.00013	21	21.28
17	-0.00023	-0.00009	0.00014	30	20.68

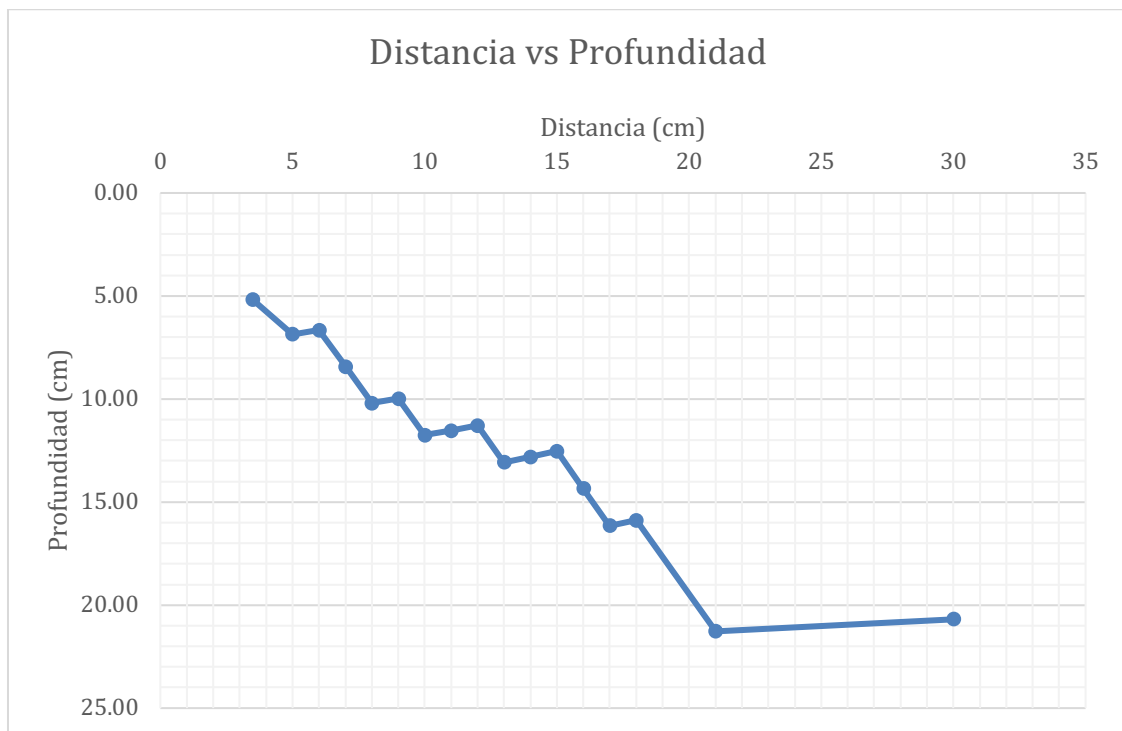


Figura 13. Gráfico distancia vs profundidad - Fase 2

2.3.4 Análisis de resultados

En las Figuras 10, 11 y 12 se muestra cómo se registraron las señales para esta fase. De esta manera se logró medir el tiempo que se demoró en llegar la señal del transductor al

acelerómetro, conociendo su distancia y la velocidad de onda se puede calcular la profundidad. La Tabla 5 presenta los datos obtenidos para cada señal y su respectiva profundidad calculada con la ecuación (4). Después de analizar los datos se observó que mientras más se alejaba el transductor del acelerómetro, la señal era más difícil de registrar. Además, según el ACI 228.2R se recomienda que para el método de pulso eco se utilicen transductores de al menos 200 kHz de frecuencia y que normalmente se utilizan transductores con frecuencias de 1 MHz. Sabiendo esto se puede decir que la señal que la frecuencia que se utilizó es muy baja y por lo tanto es más difícil registrar la llegada de la onda al acelerómetro lo cual dificultó el cálculo del delta de tiempo y por esto las distancias graficadas no representan la distancia esperada.

2.4 Fase 3: Profundidad de una losa de contrapiso mediante el método de impacto eco

Para la Fase 3 se trabajó con una losa de contrapiso en donde se utilizó el método de impacto eco para poder determinar la profundidad de la losa y sus defectos, con la finalidad de realizar una tomografía para esta losa. Para esta fase se utilizó un programa en Matlab que procesa varias señales y permite obtener una tomografía de todas las señales. El programa se encuentra en el anexo C

2.4.1 Materiales y Configuración

Para la fase tres se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- Osciloscopio (BK Precision 2530B)
- Acelerómetro
- Esferas de acero (5mm y 10mm)
- Acondicionador de señal
- Losa de contrapiso de hormigón

Los parámetros para la Fase 3 están especificados en la Tabla 6.

Tabla 7. Parámetros Fase 2

Parámetros	Datos
Diámetro Esfera	5mm y 10mm
Δt	$8 \mu s$
fs: Frecuencia de muestreo	125 kHz
fmax: 1/2fs	62.5 kHz
NFFT	4096
$NFFT * \Delta t$	32.76 ms
$\Delta f = \frac{1}{NFFT * \Delta t}$	0.030 kHz

2.4.2 Metodología

La metodología utilizada es la misma que se utilizó en la Fase 1 con los mismos equipos. A diferencia, se trabajó en una losa de contrapiso y el espaciamento utilizado fue de 2 cm, además se utilizó dos diámetros de esferas distintas una de 5 mm y una de 10 mm.

2.4.3 Resultados

En la Figura 12 y Figura 13 se muestran imágenes representativas obtenidas Fase 3 para ambas esferas. En ambos casos se muestra la señal en azul y la parte tomate es la parte porción de señal analizada en el programa de Matlab. Con el código en el anexo C, se procedió a procesar cada uno de los datos y obtener una imagen de tomografía de dos dimensiones. Los resultados obtenidos con el impacto de la esfera de 5 mm se presentan en la Figura 14, y los resultados obtenidos con el impacto de la esfera de 10 mm se presentan en la Figura 15

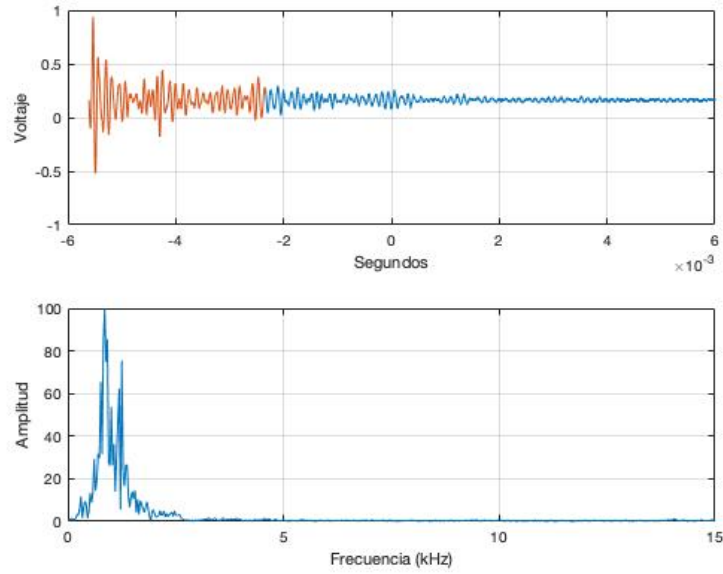


Figura 14. Forma de Onda y Espectro de frecuencias fase 3 (Esfera de 5 mm)

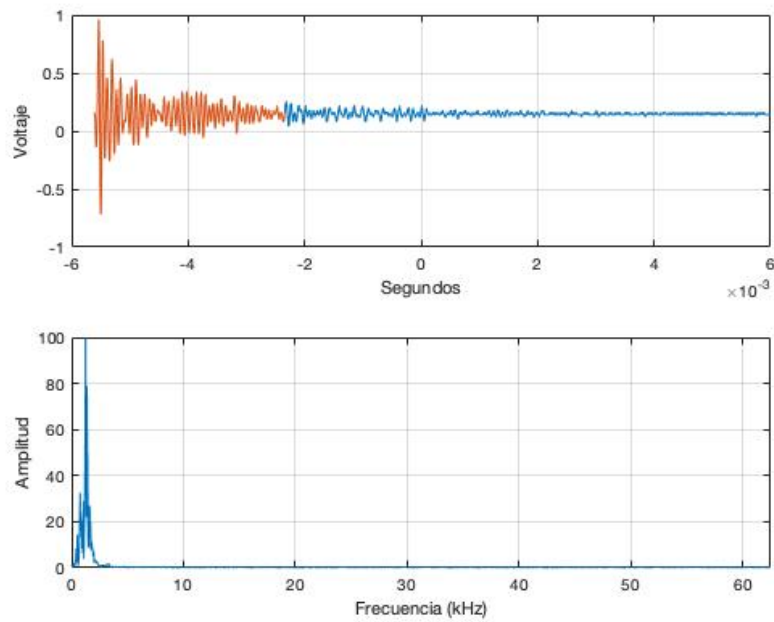


Figura 15. Forma de Onda y Espectro de frecuencias fase 3 (Esfera de 10 mm)

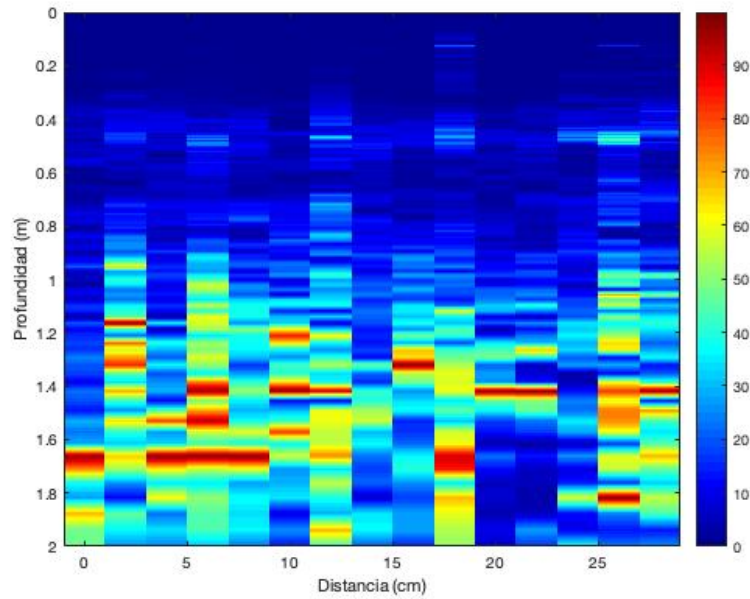


Figura 16. Tomografía para varias señales registradas fase 3 (Esfera 5 mm)

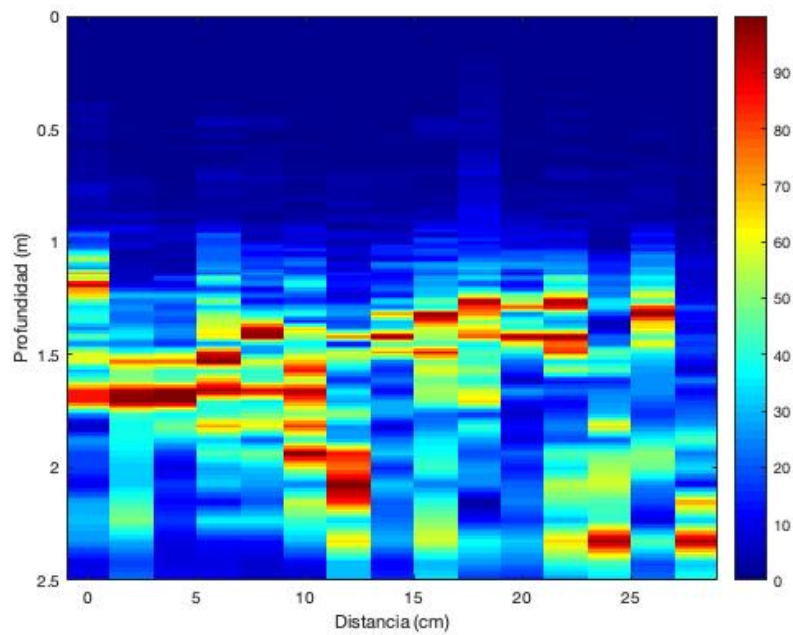


Figura 17. Tomografía para varias señales registradas fase 3 (Esfera 10mm)

2.4.4 Análisis de resultados

Después de procesar todas las señales se puede ver que no se localiza un fondo claro de losa para ninguna de las dos esferas, sin embargo, en el espectro de frecuencias se puede ver un pico más claro a comparación del espectro de frecuencias obtenido en la fase uno de esta

investigación. Luego de revisar la norma ASTM C1383 se concluyó que la frecuencia utilizada para esta fase no es la indicada, la norma recomienda un rango de frecuencias entre 250 kHz y 500 kHz. Para esta fase se utilizó una frecuencia mas baja a la especificada debido a que el osciloscopio da una frecuencia de 125 kHz y no se la puede modificar. Es por esto que ahora el problema no son los modos de vibración de la placa, debido a que esta si cumple con las dimensiones mínimas, más bien es un problema de configuración del osciloscopio.

2.5 Fase 4: Obtención de profundidad de losa de contrapiso mediante el método de impacto eco a altas frecuencias

Para la Fase 4 se trabajó con la misma losa de contrapiso que en la fase tres, igualmente con el método de impacto eco con un espaciamiento de dos centímetros entre puntos de muestreo y se explora la posibilidad de generar una tomografía en tres dimensiones a partir de imágenes en dos dimensiones. A diferencia con la fase tres es que se utiliza un osciloscopio electrónico que permite modificar la frecuencia de muestreo. El programa que se utilizó para esta fase se encuentra en el anexo C.

2.5.1 Materiales y Configuración

Para la fase cuatro se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- Osciloscopio (Analog Discovery 2)
- Acelerómetro
- Esferas de acero (5mm y 10mm)
- Acondicionador de señal
- Losa de contrapiso de hormigón

Los parámetros para la fase tres están especificados en la siguiente tabla:

Tabla 8. Parámetros Fase 3 – Esfera de 5mm

Diámetro Esfera	Parámetros	Datos	
Esfera de 5mm	Δt	$5 \mu s$	$2 \mu s$
	fs: Frecuencia de muestreo	200 kHz	500 kHz
	fmax: 1/2fs	100 kHz	250kHz
	NFFT	512	2048
	$NFFT * \Delta t$	2.56 ms	4.096 ms
	$\Delta f = \frac{1}{NFFT * \Delta t}$	0.390 kHz	0.244 kHz

Tabla 9. Parámetros Fase 3 – Esfera de 10mm

Diámetro Esfera	Parámetros	Datos
Esfera de 10mm	Δt	$2 \mu s$
	fs: Frecuencia de muestreo	500 kHz
	fmax: 1/2fs	250 kHz
	NFFT	2048
	$NFFT * \Delta t$	4.096 ms
	$\Delta f = \frac{1}{NFFT * \Delta t}$	0.488 kHz

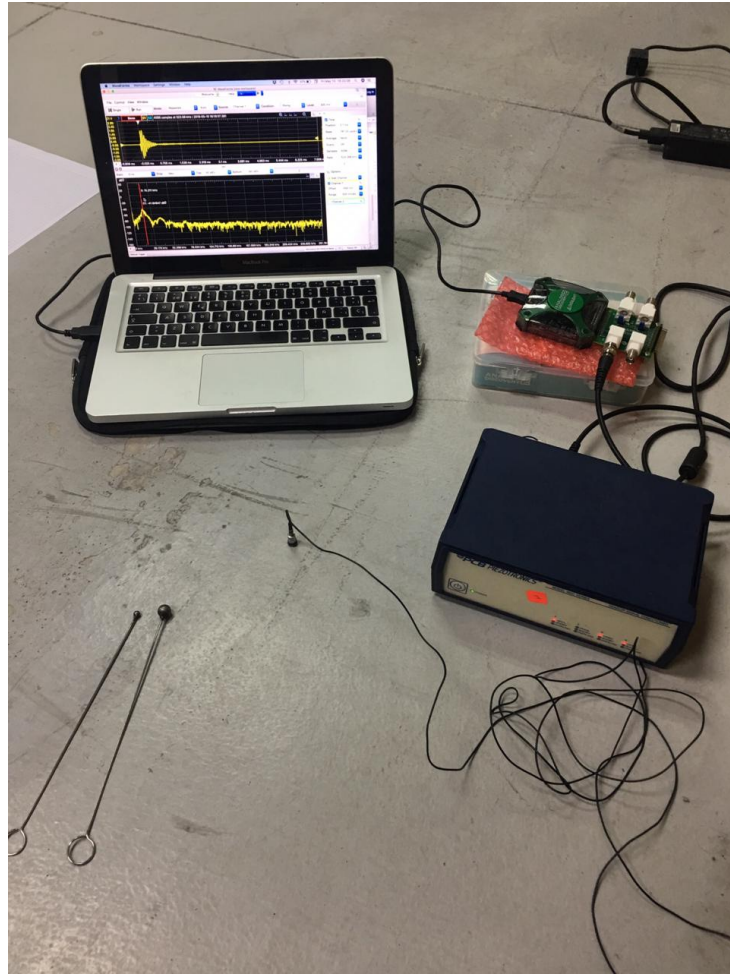


Figura 18. Configuración fase 4 con osciloscopio electrónico

2.5.2 Metodología

La metodología utilizada en esta fase es la misma metodología que se utilizó en la fase uno y en la fase tres. Se trabajó en la misma losa de contrapiso que la losa de la fase tres, se utilizó un espaciamiento de 2cm entre puntos de muestreo. A diferencia de la anterior fase, para esta fase se utilizó un osciloscopio electrónico el Analog Discovery 2. A continuación se describe cómo se obtuvieron los datos:

- Primero se conectó el acelerómetro al acondicionador de onda y del acondicionador de onda se conecta al osciloscopio electrónico. El osciloscopio electrónico va conectado directamente a la computadora. Previo a esto se necesita descargar el programa gratuito Waveforms que permite manejar el osciloscopio desde la computadora.

- Una vez conectado los equipos se calibra el voltaje máximo del osciloscopio, el nivel de disparo, el número de puntos que va a registrar el osciloscopio y la frecuencia de muestreo del osciloscopio.
- Se acopla el acelerómetro a la losa de contrapiso con una cera que mejora el acoplamiento para poder registrar la onda y se procede a guardar las ondas directamente al computador con una extensión .csv de archivo.

2.5.3 Resultados

A continuación, se presentan los datos obtenidos para cada esfera de acero, es decir, para la esfera de acero de 5mm se trabajó con dos frecuencias de muestreo distintas, una a 200 kHz y la otra a 500 kHz. Para la esfera de acero de 10mm se trabajó solo con una frecuencia de muestreo de 500 kHz. La configuración para esta fase se encuentra en la Figura 18.

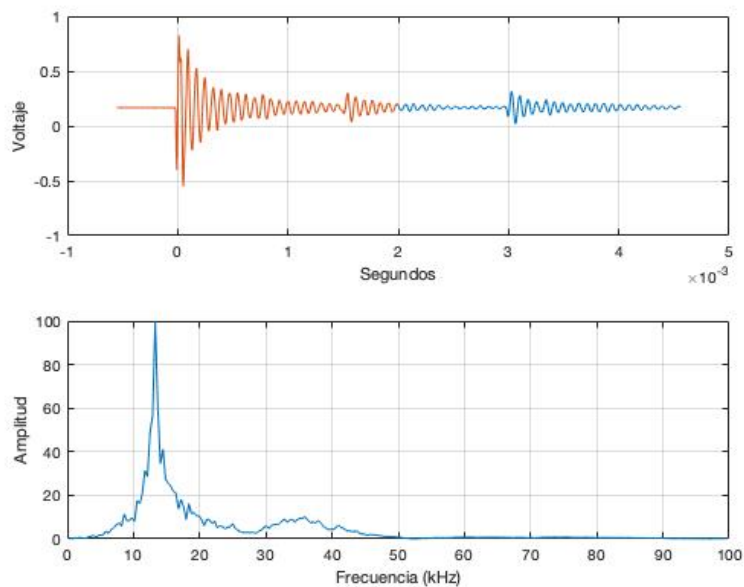


Figura 19. Forma de onda y espectro de frecuencias – f_s : 200 kHz (Esfera 5mm)

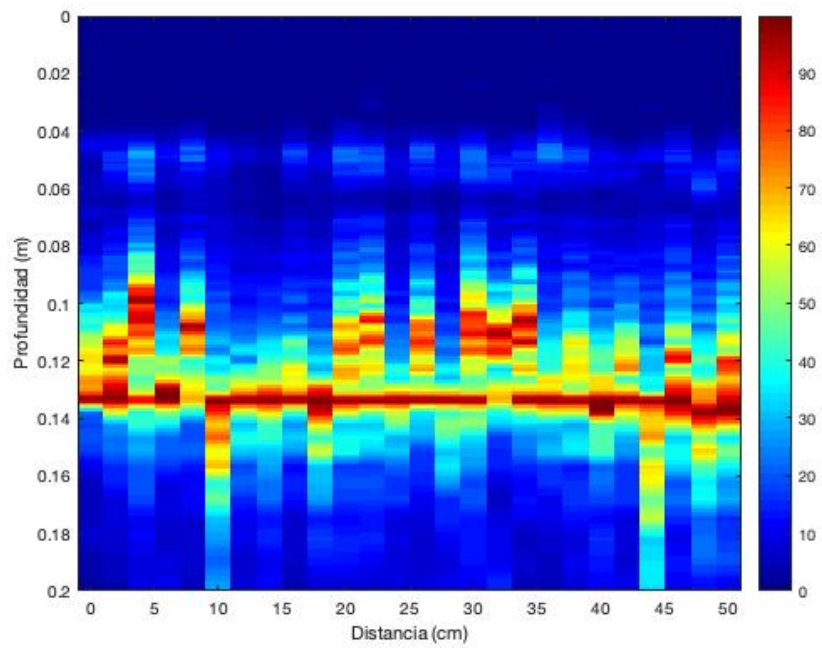


Figura 20. Tomografía para varias señales registradas - $f_s:200\text{kHz}$, NFFT 512 (Esfera 5mm)

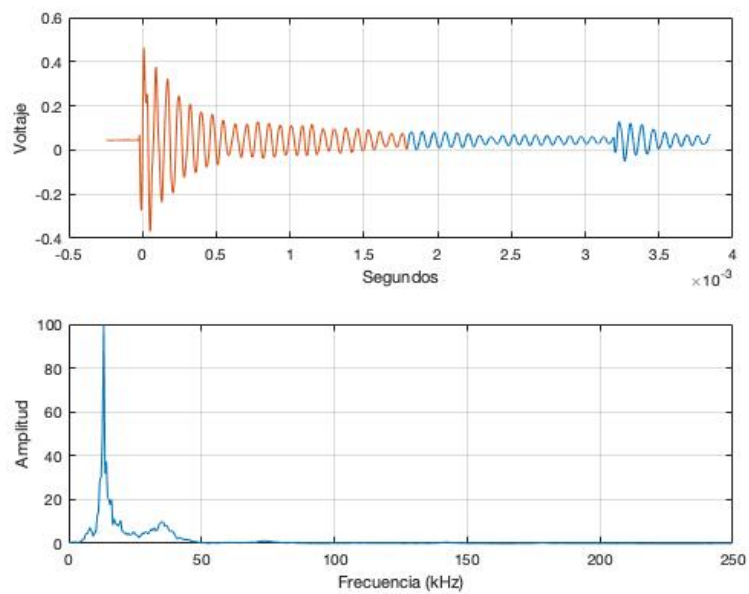


Figura 21. Forma de onda y espectro de frecuencias - $f_s:500\text{ kHz}$, NFFT: 2048 (Esfera 5mm)

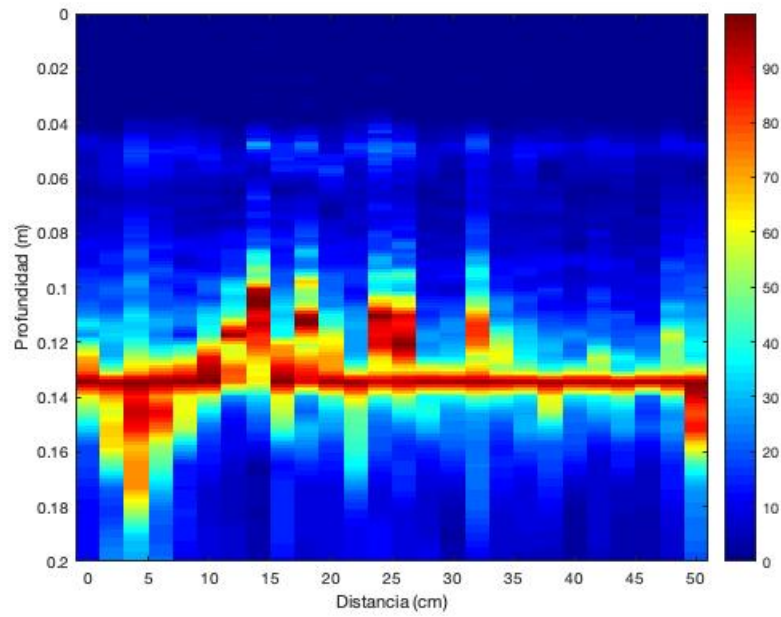


Figura 22. Tomografía para varias señales - $f_s: 500\text{kHz}$, $NFFT: 2048$ (Esfera 5mm)

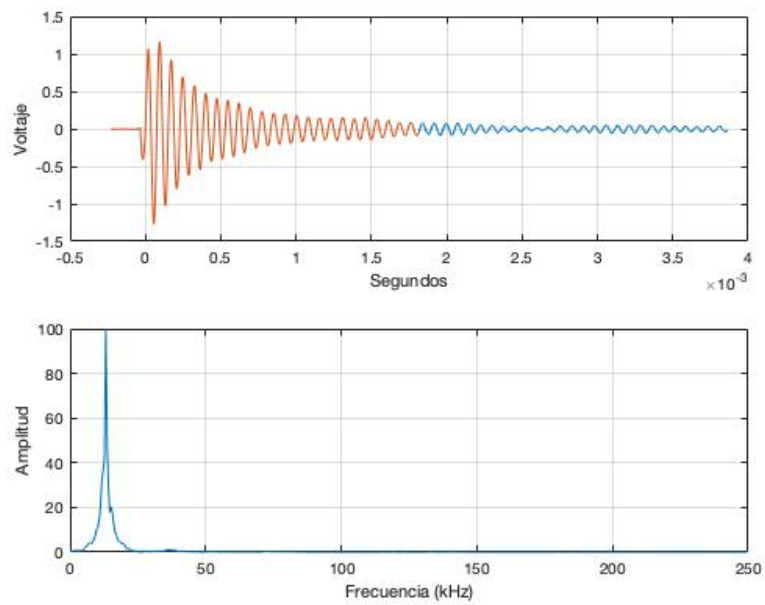


Figura 23. Forma de onda y espectro de frecuencias - $f_s: 500\text{ kHz}$, $NFFT: 2048$ (esfera 10mm)

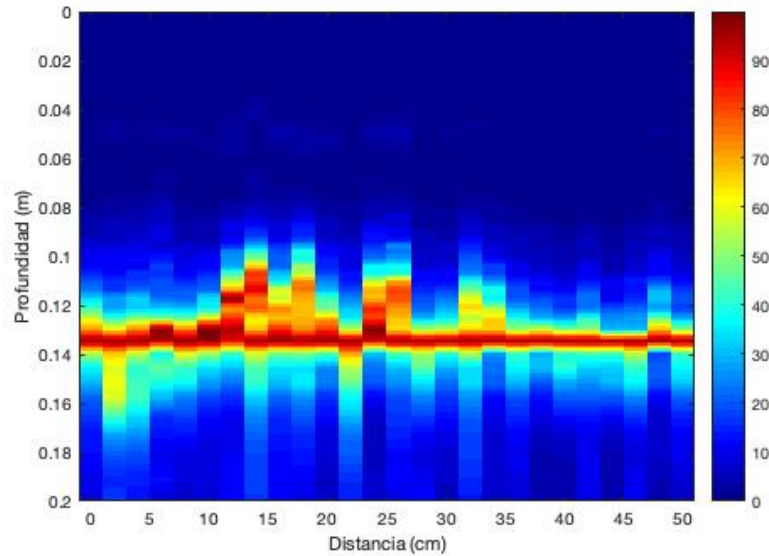


Figura 24. Tomografía para varias señales - $f_s: 500 \text{ kHz}$, $NFFT: 2048$ (esfera 10mm)

2.5.4 Análisis de resultados

Después de observar las tres tomografías obtenidas en esta fase se puede ver que claramente existe un fondo de losa en una profundidad de 0.13 metros. Por lo tanto, se puede concluir que el espesor de la losa de contrapiso es de aproximadamente 0.13 metros, en los planos constructivos se verificó que la losa de contrapiso tiene un espesor de 0.10 metros por lo que se puede decir que se tiene que corregir el valor de velocidad de onda en la ecuación (3). El error que se tuvo en las fases anteriores fue debido a que se escogió mal el valor de la frecuencia de muestreo, ya que una vez que se cambió este valor los valores de profundidad de losa convergieron en valores iguales para la esfera de 5mm y la de 10mm.

2.6 Fase 5: Obtención de una tomografía en 3D utilizando el método de impacto eco

Para la Fase 5 se exploró la posibilidad de generar una tomografía en tres dimensiones a partir de las tomografías en dos dimensiones. Para esta fase se utilizó un programa desarrollado en Matlab que procesa varias señales y obtiene varias tomografías, junta estas tomografías y genera una imagen en tres dimensiones. El programa se encuentra adjunto en el anexo D.

2.6.1 Materiales y Configuración

Los materiales son los mismos que se utilizaron en la fase cuatro a diferencia de que para esta fase solo se utilizó una esfera de cinco milímetros.

Tabla 10. Parámetros utilizados para la fase 5

Diámetro Esfera	Parámetros	Datos
Esfera de 5mm	Δt	$2 \mu s$
	fs: Frecuencia de muestreo	500 kHz
	fmax: 1/2fs	250 kHz
	NFFT	2048
	$NFFT * \Delta t$	4.096 ms
	$\Delta f = \frac{1}{NFFT * \Delta t}$	0.488 kHz

2.6.2 Metodología

Para la fase cinco se utilizó la misma metodología que en la fase cuatro. La única diferencia es que se trabajó con una esfera de 5mm con los parámetros establecidos anteriormente.

2.6.3 Resultados

A continuación, se muestra la tomografía más representativa obtenida del programa desarrollado. Se procesaron 12 señales en 8 planos diferentes con una separación entre plano y plano de dos centímetros. Todas las tomografías obtenidas se encuentran en el anexo F. En la Figura 25 se encuentra en plano de losa de contrapiso con su espesor.

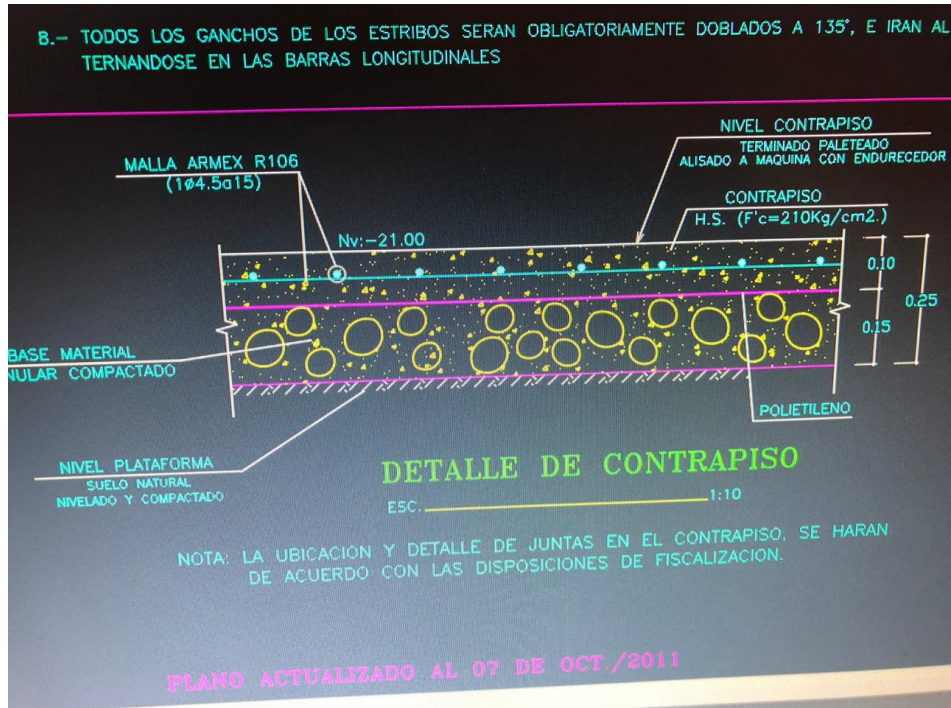


Figura 25. Plano ASBUILT losa contrapiso

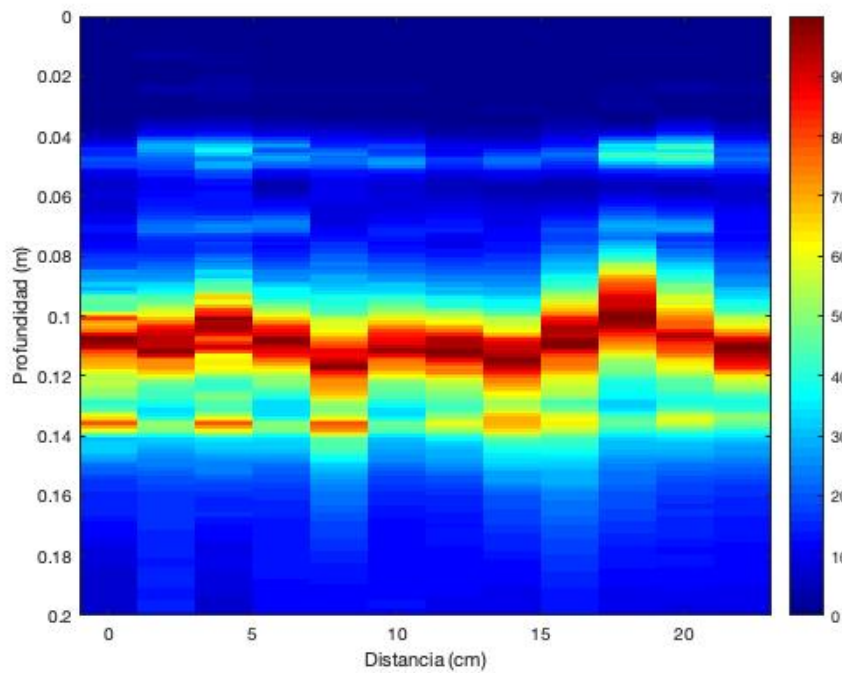


Figura 26. Tomografía en 2D mas representativa de la fase 5

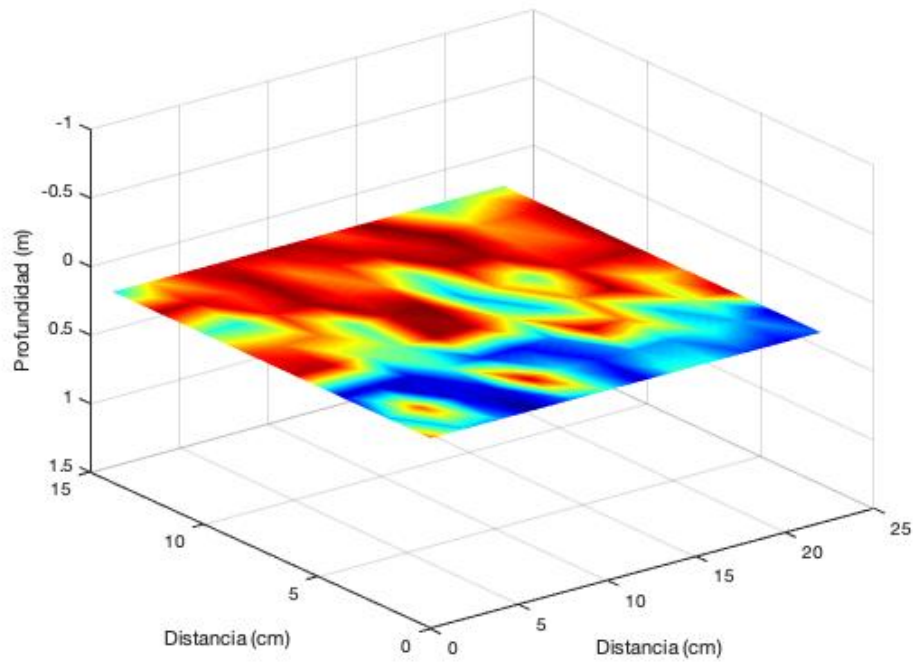


Figura 27. Plano de corte en la tomografía en 3D

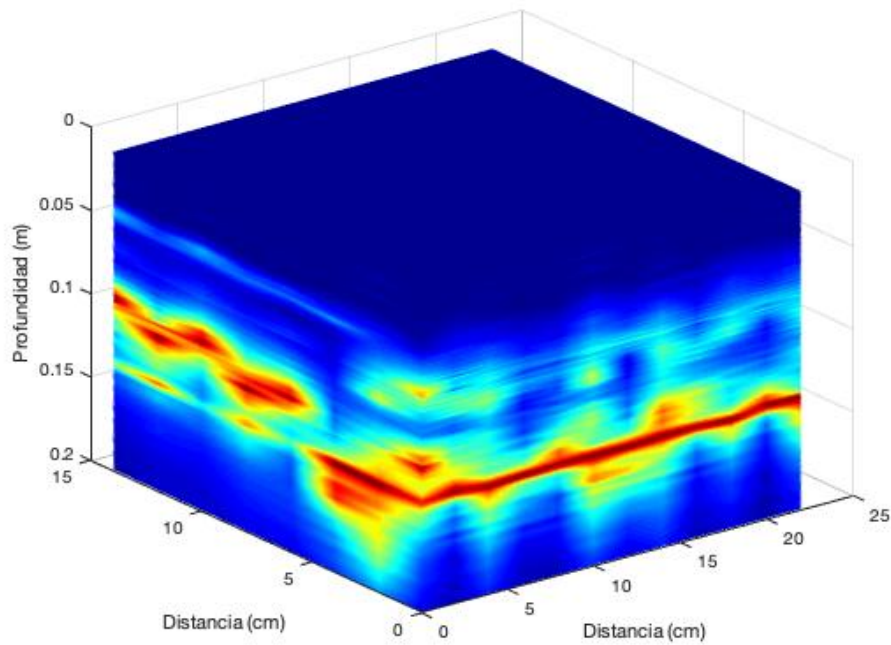


Figura 28. Tomografía en 3D – losa contrapiso

2.6.4 Análisis de Resultados

Después de analizar los resultados obtenidos se puede decir que se puede obtener una tomografía en 3D. El color rojo de la figura 24 nos muestran los picos del espectro de frecuencias para todas las señales, es decir la profundidad de la losa de contrapiso. Al comparar con los planos ASBUILT de la figura 22 se puede ver que nos da un espesor de losa de 10cm. Existen algunas diferencias y no se ve claramente un plano de profundidad de la losa, esto es debido a que se utilizó mucha cera acoplante para el acelerómetro en algunos puntos, por lo que se puede concluir que la cera afecta la señal registrada y puede dañar los datos obtenidos.

3. CONCLUSIONES

3.1 Conclusiones

Después de realizar el presente trabajo de titulación se concluye lo siguiente para cada fase.

Fase 1

- a) Se desarrolló un programa en Matlab que permite procesar la señal de un impacto eco para graficar las profundidades a las cuales se obtiene un eco.
- b) Los resultados obtenidos no correspondieron con las dimensiones del espécimen ensayado; se observó varios picos de resonancia, seguramente asociados a los modos de vibración del espécimen.

Fase 2

- c) Se analizaron 18 señales mediante el método de pulso eco utilizando ondas de esfuerzo P.
- d) El método de pulso eco con ondas P en el espécimen de 40 x 20 x 20 cm generó profundidades de rebote no-confiables.

Fase 3

- d) Se obtuvo 30 señales de impacto-eco para una losa de contrapiso.
- e) Se desarrolló un programa de procesamiento de señales para obtener una imagen de tomografía para un plano de ensayo.
- f) La frecuencia de muestreo de 125 kHz fue insuficiente para obtener datos confiables de la profundidad de losa.

Fase 4

- g) Se procesaron 78 señales, obteniendo profundidades de rebote confiables.
- h) Las frecuencias de muestreo entre 200 y 500 kHz, e impactadores de acero de 5 mm y 10 mm fueron adecuadas para detectar el espesor de la losa de aproximadamente 10 cm. de espesor.

Fase 5:

- i) Se obtuvo señales de un arreglo de 1023 x 12 puntos para una losa de contrapiso.
- j) Se utilizó una configuración de 500 kHz de frecuencia de muestreo, 2048 puntos, e impactador de 5 mm, con lo cual se obtuvo una superficie de rebote esperada de alrededor de 10 cm.
- k) Se desarrolló un programa computacional para procesar las señales, y se logró obtener una tomografía en 3D en la cual se detectó la superficie de rebote del fondo de la losa.

3.2 Recomendaciones

Finalmente, después de obtener varias tomografías se puede recomendar lo siguiente:

- a) El acelerómetro utilizado es muy sensible, pero se tiene que tener un correcto uso de la cera acoplante debido a que cuando se utilizó mucha cera acoplante para pegar el acelerómetro al hormigón se obtuvo diferentes espectros de frecuencias. Por esto se recomienda utilizar la mínima cantidad de cera.
- b) Se recomienda familiarizarse previamente con el osciloscopio para obtener curvas válidas que especifica la ASTM C1383; el osciloscopio electrónico Analog Discovery 2 con el programa Waveforms fue adecuado para este tipo de aplicación.
- c) Se recomienda explorar el método de pulso-eco utilizando ondas de esfuerzo de cortante.
- d) Se recomienda explorar el uso de transductores de contacto de punta seca (dry point contact).
- e) Si se utilizan especímenes de ensayo, se recomienda que el espesor de los mismos sean al menos seis veces la dimensión de sus lados para evitar la interferencia de los modos de vibración de los especímenes.

- f) Se recomienda continuar desarrollando el programa computacional para que la interfaz de usuario y el análisis tomográfico en 3D sea versátil.

4. BIBLIOGRAFÍA

ACI-228.2R. (2013). *Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*. Farmington Hills: American Concrete Institute.

ASTM-C1383. (2015). *Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*. West Conshohocken : ASTM International.

Carino, N. J. (15 - 17 de September de 2015). Obtenido de The Largest Open Access Portal of Nondestructive Testing (NDT):

<https://www.ndt.net/search/docs.php3?showForm=off&id=18424>

Germann-Instruments. (22 de Marzo de 2019). Obtenido de Flaw detection Docter:

<http://germann.org/products-by-application/flaw-detection/docter>

Germann-Instruments. (31 de Marzo de 2019). *Germann Instruments*. Obtenido de Flaw detection MIRA: <http://germann.org/products-by-application/flaw-detection/mira>

Mathworks. (8 de Mayo de 2019). *Fourier Transforms*. Obtenido de Mathworks:

<https://www.mathworks.com/help/matlab/math/fourier-transforms.html>

Proceq. (10 de Marzo de 2019). *Portable Ground Penetrating Radar - Proceq GPR Live*.

Obtenido de Proceq: <https://www.proceq.com/product/proceq-gpr-live/>

Proceq. (3 de Marzo de 2019). *Pundit ultrasonic pulse velocity and pulse echo tomography*.

Obtenido de Proceq: <https://www.proceq.com/compare/pundit-ultrasonic-pulse-velocity-and-pulse-echo-testing/>

ANEXO A: PROGRAMA EN MATLAB PARA PROCESAR UNA SEÑAL - FASE 1

```

clear all
clc

R3=2; %FILA EN DONDE EMPIEZAN LOS DATOS OBTENIDOS
C4=3; %COLUMNA EN DONDE EMPIEZAN LOS DATOS OBTENIDOS
M=csvread('BK000010.csv',R3,C4);
NFFT=2^13 %NUMERO PARA TRANSFORMADA DE FOURIER
V=3650; %VELOCIDAD DE ONDA (M/S)

[y,x]=max(abs(M(:,2)));
A=(M([x-200:length(M)],[1 2]));

Fs=125; %FRECUENCIA DE MUESTREO (kHz)

freq(:,1)=(1:NFFT/2-1)*Fs/NFFT; %FRECUENCIA PARA PLOTEAR

F=(fft(A,NFFT)); %APLICA FFT

Amp_F=abs(F); %SE CONVIERTE A NUMEROS REALES LOS NUMERO IMAGINARIOS

F_1=(Amp_F([2:NFFT/2],2));

delta_d=0.001;
d=0;

for ii=1:length(freq) %SE NORMALIZA LAS AMPLITUDES A VALORES DE 0 - 100

    if F_1(ii,1)==max(F_1)

        F_2(ii,1)=max(F_1)/(F_1(ii,1))*100;
    else
        F_2(ii,1)=F_1(ii,1)/max(F_1)*100;
    end

end

for ii=2:length(freq) % PARA UNA PROFUNDIDAD CONSTANTE SE ENCUENTRA LA
AMPLITUD Y LA FRECUENCIA

    d(ii,1)=d(ii-1,1)+delta_d;

    f(ii,1)=V/(2*d(ii,1))*1/1000;

    AA=interp1(freq,F_2,f(ii,1));

    Amplitud(ii,1)=AA;

end

figure
subplot(1,2,1)
imagesc(1,freq,F_2)

```

```

colormap(jet);
ax = gca;
ax.YDir = 'normal'
xlabel('Numero de Datos')
ylabel('Frecuencia (kHz)')
colorbar
ylim([0 10])

subplot(1,2,2)
plot(F_2,freq)
set(gca, 'YDir','normal')
grid on
ylim([0 10])
ylabel('Frecuencia (kHz)')
xlabel('Amplitud Normalizada')

figure
subplot(1,3,1)
imagesc(1,d,Amplitud)
ax = gca;
colormap(jet)
ax.YDir = 'normal'
xlabel('Señal')
ylabel('Distancia (m)')
colorbar
ylim([0 4])

subplot(1,3,2)
plot(Amplitud,d)
ylabel('Distancia (m)')
xlabel('Amplitud Normalizada')
grid on
ylim([0 4])

subplot(1,3,3)
plot(A(:,2),A(:,1),A([1:NFFT],2),A([1:NFFT],1))
ylabel('Segundos')
xlabel('Voltaje')
grid on

figure
subplot(2,1,1)
plot(A(:,1),A(:,2),A([1:NFFT],1),A([1:NFFT],2))
xlabel('Segundos')
ylabel('Voltaje')
grid on

subplot(2,1,2)
plot(freq,abs(real(F_2)))
grid on
xlabel('Frecuencia (kHz)')
ylabel('Amplitud')
xlim([0 10])

```

ANEXO B: PROGRAMA MATLAB – FASE 2

```
clear all
clc

R3=2; %FILA DONDE EMPIEZAN LOS DATOS
C4=3; %COLUMNA DONDE EMPIEZAN LOS DATOS
C5=4; %COLUMNA DONDE EMPIEZAN LOS DATOS
M=csvread('BK000001.csv',R3,3);

plot(M(:,1),[M(:,2)-2 M(:,3)] )
grid on
xlabel('Segundos')
ylabel('Voltaje')
legend('Señal Transductor','Señal Acelerómetro')
```

ANEXO C: PROGRAMA PROCESAMIENTO VARIAS SEÑALES PARA OBTENER TOMOGRAFIA EN 2D MATLAB – FASE 3 Y FASE 4

```

clear all
clc

Location = uigetdir(); %UBICA LA DIRECCION EN DONDE ESTAN LOS ARCHIVOS DE
LAS SEÑALES
D = dir(fullfile(Location, '*.csv' ));

NFFT=2^12
R3=2; %FILAS DONDE EMPIEZAN LOS DATOS
C4=3; %COLUMNA DONDE EMPIEZAN LOS DATOS
Fs=125; % FRECUENCIA DE MUESTREO (kHz)
freq=(1:NFFT/2-1)*Fs/NFFT; %FRECUENCIA PARA PLOTEAR

d=0;

delta_d=0.01;

L=hamming(length(NFFT)); %FILTRO HAMMING

for i = 1:length(D)

    fullname = [Location filesep D(i).name];
    data{i} = csvread(fullname,R3,C4);

    [y,x]=max(abs(data{i}(:,2)));

    A{i}=(data{i}([1:length(data{i})], [1 2])); %x-100

    F=(fft(A{i}.*L,NFFT));
    F_1(:,1)=(abs(F([2:NFFT/2],2)));

    for ii=1:length(freq)

        if F_1(ii,1)==max(F_1)

            F_2(ii,1)=max(F_1)/(F_1(ii,1))*100;
        else
            F_2(ii,1)=F_1(ii,1)/max(F_1)*100;
        end

    end

end

for ii=2:length(freq)

```

```

    d(ii,1)=d(ii-1,1)+delta_d;

    f(ii,1)=3550/(2*d(ii,1))*1/1000;

    AA=interp1(freq,F_2,f(ii,1));

    Amplitud(ii,1)=AA;

end
ddd(:,1)=d;
AAA(:,i)=Amplitud; %Matriz Magnitudes tomografv#a

Magnitud(:,i)=(F_2);
[Y(i) X(i)]=max(Amplitud);
XX(i,1)=f(X(i),1); %Frecuencia del pv#co mv#ximo

figure
subplot(2,1,1)
plot(A{i}(:,1),A{i}(:,2),A{i}([1:NFFT-1],1),A{i}([1:NFFT-1],2))
xlabel('Segundos')
ylabel('Voltaje')
grid on

subplot(2,1,2)
plot(freq,Magnitud(:,i))
grid on
xlim([0 50])
ylabel('Amplitud')
xlabel('Frecuencia (kHz)')

end

xxx=linspace(0,(length(D)-1)*2,length(D));

figure
imagesc(xxx,ddd,AAA)
colormap(jet);
ax = gca;
ax.YDir = 'reverse';
xlabel('Distancia (cm)')
ylabel('Profundidad (m)')
colorbar
ylim([0 0.2])

```

ANEXO D: PROGRAMA PROCESAMIENTO VARIAS SEÑALES PARA OBTENER TOMOGRAFIA EN 3D MATLAB

```

clear all
clc

NFFT=2^11
R3=2; %2
C4=0; %0
Fs=500; %kHz
V=3650; %M/S
freq=(1:NFFT/2-1)*Fs/NFFT;

d=0;
delta_d=0.001;

L=hamming(length(NFFT)); %Filtro

Location = uigetdir();
S = dir(fullfile(Location, '*'));
N(:,1)= setdiff({S([S.isdir]).name},{'.','..'});
for ii = 1:numel(N)

    T = dir(fullfile(Location,N{ii}, '*.csv'));
    C(:,1)= {T(~[T.isdir]).name};
    X=linspace(0,(length(C)-1)*2,length(C));
    Y=linspace(0,(length(N)-1)*2,length(N));
    [Xx, Yy]=meshgrid(X,Y);

    for k = 1:length(C)

        D = fullfile(Location,N{ii},C{k});
        data{k} = csvread(D,R3,C4);

        [y,x]=max(abs(data{k}(:,2)));

        A{k}=(data{k}([1:length(data{k})],[1 2])); %x-100

        F=(fft(A{k}.*L,NFFT));
        F_1(:,1)=(abs(F([2:NFFT/2],2)));

        for j=1:length(freq)

            if F_1(j,1)==max(F_1)

                F_2(j,1)=max(F_1)/(F_1(j,1))*1;
            else
                F_2(j,1)=F_1(j,1)/max(F_1)*1;
            end

            end

```

```

end

for jj=2:length(freq)

    d(jj,1)=d(jj-1,1)+delta_d;

    f(jj,1)=V/(2*d(jj,1))*1/1000;

    AA=interp1(freq,F_2,f(jj,1));
    Z(:,:,jj)=d(jj,1).*ones(length(N),length(C));

    Amplitud(jj,1)=AA;

end

Color(ii,k,:)=Amplitud;

AAA(:,k)=Amplitud; %Matriz Magnitudes tomografv#a

Magnitud(:,k)=(F_2);

end

ddd(:,1)=d;

Amplitud_y(:,:,2)=AAA;

end

axis tight manual
filename = 'testAnimated3.gif';

for p=10:5:200

    h=figure
    surf(Xx,Yy,Z(:,:,p),Color(:,:,p))
    shading interp

    colormap(jet);
    ax = gca;
    ax.ZDir = 'reverse';
    xlabel('Distancia (cm)')
    ylabel('Distancia (cm)')
    zlabel('Profundidad (m)')
    hold on

    frame = getframe(h);
    im = frame2im(frame);

```

```
[imind,cm] = rgb2ind(im,256);  
  
if p == 10  
    imwrite(imind,cm,filename,'gif', 'Loopcount',inf);  
else  
    imwrite(imind,cm,filename,'gif','WriteMode','append');  
end  
  
end
```


ANEXO F: TOMOGRAFÍAS EN 2D OBTENIDAS DE LA FASE 5

