

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL**



**CONSTRUCCION DE TOMOGRAFÍAS USANDO METODOLOGÍAS
SÓNICAS COMO HERRAMIENTAS PARA EL DIAGNÓSTICO
ESTRUCTURAL DE MONUMENTOS HISTÓRICOS**

Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería Civil

Presentado por:

Cristhian Germán Saucedo Abanto

ASESOR

Dr. Rafael Aguilar Velez

Lima, Abril 2016

...para mi familia

Agradecimientos

Esta tesis no se hubiera completado sin la ayuda de todos los que, directamente o indirectamente, estuvieron involucrados en mi trabajo y satisfactoriamente contribuyeron para su conclusión. Entre los diferentes apoyos, quisiera expresar mi gratitud a:

- Al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) por el financiamiento de los estudios de maestría a través del programa de becas para estudio de posgrado.
- Dr. Rafael Aguilar, mi asesor. Por su exigencia, apoyo y confianza para desarrollar esta investigación. Por brindarme la posibilidad de ser parte de un equipo interdisciplinario que contribuye con la investigación internacional.
- Al profesor Luis Ramos por compartir sus experiencias y aprendizajes en los casos de estudio que se desarrollaron en esta tesis.
- A mis amigos del grupo de investigación Engineering & Heritage por su constante apoyo en los momentos más difíciles y la amistad sembrada en nosotros.
- A la Dirección de Gestión de la Investigación DGI PUCP por el financiamiento de los proyectos de investigación 2014-89 y 2015-171 dentro de los cuales se enmarca este trabajo.
- Al Laboratorio de Estructuras y al Laboratorio de Materiales por la disponibilidad de sus instalaciones y equipos.

Y finalmente quisiera hacer un especial agradecimiento a mi familia:

- A mis padres por su apoyo constante. Me dieron fuerzas en los momentos más difíciles y confiaron en que podía sacar este trabajo adelante.
- A mis otras dos mamás, Carmela y Maruja, que me cuidaron y me apoyaron durante esta experiencia.
- A mi compañera en la vida, la cual cambió mi manera de ver el mundo y me apoyó incondicionalmente en el transcurso de esta investigación, Andrea.

Resumen

La conservación de un monumento histórico comprende todas aquellas actividades que prolongan la duración de su herencia cultural y que permiten su utilización en la actualidad y en el futuro. Las intervenciones requeridas para su conservación apelan al conocimiento de la geometría, del estado de conservación de las construcciones y de los materiales que las integran. Es por ello que una de las etapas que se llevan a cabo para la conservación de un monumento histórico es el diagnóstico de su estado actual. Existen varios métodos y técnicas de los cuales aquellos que no alteran la integridad del monumento son los más adecuados.

En función de estas consideraciones, la presente tesis tiene como objetivo contribuir con la conservación de monumentos históricos mediante la aplicación de ensayos sónicos y ultrasónicos como herramientas de diagnóstico estructural. Para este fin se realizó una revisión de la literatura de estas metodologías. Se aplicaron ensayos sónicos y ultrasónicos a diversos materiales que están presentes en las construcciones patrimoniales. Se construyeron dos muros de prueba y se obtuvieron imágenes en 2D llamadas tomografías las cuales representaron satisfactoriamente el estado interno de los muros. Se determinaron las propiedades mecánicas como módulo de elasticidad y módulo de poisson del adobe de Huaca de la Luna mediante ensayos de ultrasonido. Estos ensayos sirvieron también para crear tomografías de las unidades de adobe y evaluar cualitativamente su variabilidad. Finalmente ensayos sónicos y un análisis de Impacto eco se realizaron en sub-elementos estructurales de este monumento. En la Iglesia de Andahuaylillas se realizaron ensayos sónicos con el fin obtener tomografías y determinar el estado interno de algunos de sus sub-elementos estructurales.

Los resultados obtenidos muestran que con estos ensayos se pueden determinar las propiedades dinámicas de los materiales como en el caso de Huaca de la Luna y se puede evaluar el estado interno de subelementos estructurales mediante la creación de imágenes en 2D como se realizó en Huaca de la Luna y en la Iglesia de Andahuaylillas.

Índice General

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Índice General	iii
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas	x

1 Introducción	1
1.1 Motivación	2
1.2 Objetivos de la Tesis	2
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Metodología	3
1.4 Organización de la Tesis	3
1.5 Resultados	4

2 Ensayos para estudiar la propagación de ondas en un medio: Revisión de la literatura	5
2.1 Introducción	6
2.2 Propagación de ondas en un medio	6
2.2.1 Ensayos sónicos	6
2.2.2 Ensayos de Ultrasonido	10
2.2.3 Impacto-eco	11
2.3 Construcción de Tomografías	13

3 Ensayos sónicos, ultrasónicos y de Impacto eco aplicados para el estudio de materiales	18
3.1 Introducción	19
3.2 Descripción del Sistema	19

3.2.1	Equipo empleado	19
3.2.2	Características de las muestras	20
3.2.3	Registro de datos	22
3.3	Ensayos sónicos	23
3.3.1	Δt al inicio de cada señal	23
3.3.2	Diferencia de Picos de señales filtradas	25
3.4	Ultrasonido	29
3.5	Impacto eco	31
3.6	Resumen de resultados	32
4	Aplicación de ensayos sónicos y ultrasónicos directos en dos muros fabricados en laboratorio	34
4.1	Introducción	35
4.2	Características de los muros	35
4.2.1	Descripción del Muro 1	35
4.2.2	Descripción del Muro 2	36
4.3	Equipo empleado	38
4.4	Registro de datos	39
4.5	Interpretación de resultados	40
4.5.1	Resultados de la evaluación del muro 1	40
4.5.2	Resultados de la evaluación del muro 2	46
5	Ensayos sónicos, de ultrasonido y de Impacto eco para estudiar el material y sub-elementos estructurales en Huaca de la Luna	50
5.1	Introducción	51
5.2	Análisis de las unidades de adobe	52
5.2.1	Descripción de los ensayos realizados y material utilizado	52
5.2.2	Resultados y discusión	55
5.3	Ensayos sónicos en sub-elementos estructurales	58
5.3.1	Registro de datos	58
5.3.2	Resultados y discusión	59
5.4	Impacto eco	61

5.4.1 Datos analizados	64
5.4.2 Resultados y discusión	65
6 Ensayos sónicos en sub-elementos estructurales de la iglesia de Andahuaylillas	68
6.1 Introducción.....	69
6.2 Ensayos sónicos en materiales y sub-elementos estructurales	69
6.2.1 Registro de datos	70
6.2.2 Resultados y discusión.....	72
7 Conclusiones y trabajos futuros	75
7.1 Conclusiones.....	76
7.1.1 Ensayos en materiales y muros de prueba.....	76
7.1.2 Ensayos en materiales y muros de prueba.....	76
7.1.3 Ensayos sónicos, Impacto eco y de ultrasonido para estudiar el material y sub-elementos estructurales en Huaca de la Luna	76
7.1.4 Ensayos sónicos en sub-elementos estructurales de la iglesia de Andahuaylillas.....	77
7.2 Trabajos Futuros	77
Referencias	78
Anexos	82
Anexos del Capítulo 4.....	83
Anexos del Capítulo 5.....	87

Índice de Figuras

Figura 2.1 Tipos de configuraciones de ensayos sónicos. Adaptado de Miranda et al (2013)	6
Figura 2.2 Modelo de elementos finitos de la propagación de ondas en un medio. Adaptado de (Sansalone, et al., 1987).....	7
Figura 2.3 Tipos de ondas en un material (a) ondas longitudinales, P (b) ondas de corte, S (c) ondas superficiales, R. Adaptado de (Domus, 2014)	7
Figura 2.4 Diferencia de tiempo de dos señales adquiridas en cada receptor. Adaptado de (Miranda, et al., 2013).....	8
Figura 2.5 Metodología propuesta (a) Señales originales y filtradas (b) Diferencia de N picos de la señal filtrada.	9
Figura 2.6 Parámetros de diseño de un filtro pasabanda tipo elíptico.	9
Figura 2.7 Ensayo de ultrasonido (a) Configuración de ensayo (b) Señal adquirida.	10
Figura 2.8 Reflexiones de la Onda P en material. Adaptado de Carino J. (2001).....	12
Figura 2.9 Transformada de Fourier de un registro de datos.	12
Figura 2.10 Esquema de los métodos para determinar las velocidades sónicas en muros.(a) Métodos directos (b) Metodos indirectos (c) Métodos sem-directos. Adaptado de (ONSITEFORMASONRY, 2004).....	13
Figura 2.11 Tomografía mediante la aplicación de ensayos sónicos directos (a) Malla rectangular de 0.60x0.30 m (b) Imagen de velocidades en 2D.	14
Figura 2.12 Ensayos sónicos directos en una columna de la Catedral de Noto (a) sección de columna (b) velocidades calculadas. Adaptado de (Binda, et al., 2003b)	14
Figura 2.13 Tomografías sónicas directas (a) antes y (b) después de la inyección. .Adaptado de (Valluzzi, et al., 2009)	15
Figura 2.14 Muros de las construcciones de Aliano (a) adobe (b) adobe y sillar. Adaptado de (Liberatore, et al., 2006)	16
Figura 2.15 Ensayos sónicos directos en la Catedral de Reggio Emilia (a) malla de adquisición (b) velocidades calculadas. Adaptado de (Casarin, et al., 2013)	17
Figura 2.16 Ensayos sónicos en el palacio Riva-Herrera (a) Señales en el dominio de las frecuencias (b) Capas de piedras en los muros. Adaptado de (Lombillo, et al., 2013)	17

Figura 3.1 Equipos de medición (a) Sónicos (b) Ultrasónicos.....	19
Figura 3.2 Ensayos en probetas de concreto (a) Resistencia a compresión (b) Densidad aparente (c) contenido de humedad.	20
Figura 3.3 Granulometría de tierra de adobe. (D422, 2014).....	21
Figura 3.4 Muestras de materiales estudiados.....	22
Figura 3.5 Registro de datos (a) Ensayos sónicos en una probeta de concreto y técnica empleada en todas las muestras (b) Prueba de ultrasonido en muestra de cantería.....	23
Figura 3.6 Diferencia de tiempo de las señales adquiridas en el punto emisor y receptor.	24
Figura 3.7 Variación de la velocidad con respecto a la cantidad de puntos creados usando la interpolación de Fourier.	25
Figura 3.8 Diferencia de Picos de señales filtradas de la muestra 1 de ladrillo (a) registros (b) FFT por Welch (c) filtro elíptico (d) diferencia de picos de señales filtradas (e) resultados de Δt y V_p	26
Figura 3.9 Señales y frecuencias de reflexión máximas en materiales. Adobe, ladrillo, concreto y cantería.	27
Figura 3.10 Resultados de ultrasonido de la muestra 4 de piedra (a) registros ultrasónicos (b) configuración de ensayo y resultados.....	30
Figura 3.11 Frecuencia máxima de una muestra de concreto (a) Señales adquiridas (b) FFT por P Welch.	31
Figura 4.1 Primer muro de calibración (a) fabricación (b) irregularidades internas (c) producto final (d) esquema de distribución de materiales en su interior.	35
Figura 4.2 Segundo muro de calibración. (a) sección longitudinal (b) secciones transversales a 0.45, 0.80 y 1.05 m del nivel del terreno.....	36
Figura 4.3 Segundo muro de calibración (a) bloque de concreto entre albañilería (b) vacío interno en la piedra (c) bloque de madera entre la cantería (d) estado final del muro.....	38
Figura 4.4 Equipos de medición (a) ensayos sónicos (b) ensayo de ultrasonido	38
Figura 4.5 Red de puntos para el registro de datos en muros 1 y 2, (a) malla del muro 1, espaciamiento de 3.5 cm, (b) malla muro 2, espaciamiento de 10 cm (c) configuración de ensayos.	39
Figura 4.6 Ultrasonido en defectos internos del muro 2 (a) mortero (b) y (c) prismas de madera y concreto.....	40
Figura 4.7 Velocidades de onda P en el muro 1 aplicando ensayos sónicos (a) a lo largo de la fila 10 (b) en la columna 10.....	41
Figura 4.8 Tomografía de la cara lateral del muro 1.(a) velocidades en los puntos de ensayo (b) superposición de imagen con los materiales internos.....	42

Figura 4.9 Malla cuadrada de 3.5 cm de espaciamento usada en los ensayos de ultrasonido.	43
Figura 4.10 Velocidades de onda P en el muro 1 aplicando ensayos de ultrasonido (a) a lo largo de la fila 10 (b) en la columna 10.	44
Figura 4.11 Tomografía ultrasónica de la cara lateral del muro 1.(a) velocidades en los 49 puntos de ensayo (b) superposición de imagen con los materiales internos	45
Figura 4.12 Imágenes a una misma escala gráfica (a) Tomografía sónica (b) Tomografía ultrasónica.	46
Figura 4.13 Imágenes tomográficas de las caras frontales del muro 2 utilizando ensayos sónicos. En (a), (b), (c), (d) y (e) se comparan las imágenes con los defectos internos en las zonas de concreto, ladrillo, piedra, cantería y adobe respectivamente.	48
Figura 4.13 Imágenes tomográficas utilizando ensayos ultrasónicos de la cara lateral del muro2, (a) zona de concreto, (b) zona de ladrillo.....	49
Figura 5.1 Complejo arqueológico Huaca de la Luna: (a) esquema 3D; y (b) mural característico.....	51
Figura 5.2 Especímenes de adobe de la Huaca de la Luna (a) proceso de obtención (b) protección para el traslado.....	52
Figura 5.3 Adobe de Huaca de la Luna, ensayos de caracterización ultrasónica: (a) muestras de adobe (b) procedimiento de ensayo de ultrasonido.....	53
Figura 5.4 Ensayos de ultrasonido (a) Resultados de onda P para 54 kHz y onda S para 24 kHz y 250kHz (b)configuración de ensayo de tomografía ultrasónica(c) Toma de datos para la tomografía.....	54
Figura 5.5 Tomografías ultrasónicas. Unidad de adobe con velocidades entre (a) 1000 a 1200 m/s (b) 1200 a 1400 m/s (c) 1400 a 1600 m/s (d) Adobe con características heterogéneas.	57
Figura 5.6 Porcentaje de adobes en cada uno de los rangos de velocidades identificados.....	57
Figura 5.7 Ubicación columnas evaluadas (a) Ubicación (b) Unidad 16 (c) Salas Hipóstilas	58
Figura 5.8 Mallas para toma de datos en columnas (a) malla de 0.45x1.00m (b) Configuración de ensayo.....	59
Figura 5.9 Resultados ensayos sónicos directos en las columnas de adobe. Unidad 16 (a) C-1, (b) C-2 y (c) C-3. Salas Hipóstilas (d) C-4 y (e) C-5.....	60
Figura 5.10 Configuración de ensayo de Impacto eco en columna C-1	61
Figura 5.11 Dimensiones de los adobes de Huaca de la Luna (a) Largo (b) Ancho	62
Figura 5.12 Dimensiones de los nueve tipos de adobes considerados para el estudio de Impacto eco.	62

Figura 5.13 Análisis del contenido de frecuencias en un punto de C-1 (a) registros en el tiempo (b) FFT.....	63
Figura 5.14 Distancias de reflexión entre la superficie y el punto emisor o receptor	64
Figura 5.15 Análisis utilizando Impacto eco en la Columna C-1 (a) Sección de columna – Fila 2 (b) Adobes que resaltan en la parte posterior de la columna.	64
Figura 5.16 Distribución de las unidades de adobe en la fila 2 de la columna C-1.....	65
Figura 5.17 Distribución de las unidades de adobe en la columna C-1 (a) Fila 3, (b) Fila 6.	66
Figura 5.18 Distribución de las unidades de adobe en la columna C-4 (a) Fila 3, (b) Fila 5.	66
Figura 5.19 Distribución de las unidades de adobe en la columna C-5 (a) Fila 1, (b) Fila 3.	67
Figura 6.1 Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas (a) Foto aérea (b) Interior	69
Figura 6.2 Ubicación de ensayos sónico directos e indirectos en la iglesia de Andahuaylillas.	70
Figura 6.3 Ensayos sónicos en adobe y piedra. (a) Ensayos directos en adobe (b) Ensayos indirectos en piedras de sobre-cimiento.....	70
Figura 6.4 Mallas y configuración de ensayos sónicos (a) contrafuerte (b) muro de capilla.	71
Figura 6.5 Tomografías de las caras laterales de un sector de la Iglesia de Andahuaylillas (a) contrafuerte (b) muro de una capilla.....	73

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Propiedades de muestras de concreto	20
Tabla 3.2 Resumen de Propiedades de los materiales	21
Tabla 3.3 Dimensiones de muestras en mm	22
Tabla 3.3 Velocidades promedio obtenidos en los materiales por Δt en m/s	25
Tabla 3.4 Frecuencias máximas de las muestras (Hz)	28
Tabla 3.5 Velocidades en los materiales por diferencia de picos de señales filtradas (m/s)	28
Tabla 3.6 Velocidades en los materiales con ensayos ultrasónicos (m/s)	29
Tabla 3.7 Velocidades en los materiales por Impacto eco (m/s)	32
Tabla 3.9 Resumen de Velocidad de onda P en materiales al aplicar ensayos sónicos y ultrasónicos	33
Tabla 4.1 Longitudes de ensayos en Muro 1 en mm	40
Tabla 4.2 Velocidades de materiales internos del muro 2 (m/s)	46
Tabla 5.1. Resumen de las propiedades mecánicas de los adobes ensayados de Huaca de la Luna	56
Tabla 5.2. Distancias de reflexión	64
Tabla 6.1. Longitudes de ensayos sónicos en Andahuaylillas(m)	71
Tabla 6.2. Velocidad de onda P en materiales de Andahuaylillas (m/s)	72
Tabla 6.3. Velocidades en contrafuerte en m/s (CV)	72
Tabla 6.4. Velocidades en muro de capilla en m/s (CV)	72
Tabla A. 1 Longitudes entre los puntos de ensayo del muro 2 (mm)	83
Tabla A. 2 Velocidades de los puntos evaluados en el muro 1 aplicando ensayos sónicos (m/s)	83
Tabla A. 3 Velocidades de los puntos evaluados en el muro 1 aplicando ensayos de ultrasonido (m/s)	84
Tabla A. 4 Velocidades en el área de concreto (m/s) – muro 2	84
Tabla A. 5 Velocidades en el área de albañilería (m/s) – muro 2	84
Tabla A. 6 Velocidades en el área de piedra (m/s) – muro 2	85

Tabla A. 7 Velocidades en el área de cantería (m/s) – muro 2.....	85
Tabla A. 8 Velocidades en el área de adobe (m/s) – muro 2.....	85
Tabla A. 9 Velocidades ultrasónicas en el área de concreto (m/s) – muro2	86
Tabla A. 10 Velocidades ultrasónicas en el área de ladrillo (m/s) – muro2	86
Tabla A. 11. Velocidades columna C-1 (m/s)	87
Tabla A. 12 Velocidades columna C-2 (m/s)	87
Tabla A. 13 Velocidades columna C-3 (m/s)	87
Tabla A. 14 Velocidades columna C-4 (m/s)	87
Tabla A. 15 Velocidades columna C-5 (m/s)	88

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

En el país existe una amplia variedad de infraestructura construida a lo largo de los siglos utilizando diversos materiales. En este campo se encuentran desde las construcciones pre-incas, las iglesias de la colonia hasta las casonas. Parte de esa infraestructura ha adquirido importancia cultural y las intervenciones requeridas para su conservación apelan al conocimiento de la geometría, del estado de conservación de las construcciones y de los materiales que las integran.

La conservación de un monumento histórico comprende todas aquellas actividades que prolongan la duración de su herencia cultural y que permiten su utilización en la actualidad y en el futuro. Si bien es cierto que se puede extender la vida de las estructuras históricas mediante su conservación, se debe tener en cuenta que su deterioro es una ley inexorable de la naturaleza y que solo se puede ralentizar (Perez, 1993). Es por ello que una de las etapas que se llevan a cabo para la conservación de un monumento histórico es el diagnóstico de su estado actual. Existen varios métodos y técnicas de los cuales aquellos que no alteran la integridad del monumento son los más adecuados. Dentro de estos métodos están los ensayos sínicos y ultrasónicos.

Los ensayos sínicos y ultrasónicos permiten evaluar las propiedades mecánicas, encontrar defectos, tales como grietas, y determinar la homogeneidad de los materiales de construcción. Esto se realiza utilizando las variaciones de velocidad de las ondas y la atenuación de estas (Colla, et al., 2010)

Esta tesis permitirá estudiar el estado interno de los elementos estructurales por medio de una tomografía a partir de ensayos sínicos y ultrasónicos. En este trabajo se propuso una metodología para obtener tomografías utilizando ensayos sínicos y ultrasónicos que será validada en dos casos de construcciones patrimoniales. Con los datos de estos ensayos se pueden identificar zonas vulnerables, detectar grietas y posibles patrones de daños, además se puede verificar la efectividad de las reparaciones como el caso de las de inyección.

1.2 Objetivos de la tesis

1.2.1 Objetivo General

El objetivo principal de la tesis es contribuir con la conservación de monumentos patrimoniales mediante la aplicación de ensayos sínicos y ultrasónicos como herramientas de diagnóstico estructural. Este trabajo propone la aplicación de estos ensayos para evaluar la condición estructural de muros de albañilería de tierra y piedra.

1.2.2 Objetivos específicos

Realizar una investigación bibliográfica sobre los conceptos teóricos acerca de la propagación de ondas en un medio y la aplicación de ensayos sínicos y ultrasónicos como herramientas para el diagnóstico estructural de monumentos patrimoniales.

Evaluar las velocidades producidas por la propagación de las ondas en materiales que se pueden encontrar en los elementos estructurales de construcciones patrimoniales aplicando ensayos sónicos, ultrasónicos y de Impacto eco.

Validar la metodología para obtener imágenes tomográficas de velocidades en muros de prueba en laboratorio.

Estudiar el material y obtener tomografías de las unidades y subelementos estructurales del complejo arqueológico Huaca de la Luna aplicando ensayos sónicos y ultrasónicos.

Obtener imágenes tomográficas de subelementos estructurales de la Iglesia de Andahuaylillas aplicando ensayos sónicos.

1.3 Metodología

Para aplicar ensayos sónicos y ultrasónicos en construcciones patrimoniales primeramente se realizó una revisión bibliográfica en artículos indexados, libros, normas técnicas. Se investigaron las aplicaciones que se han realizado en estructuras similares, determinando sus alcances y los resultados obtenidos.

Luego se evaluó la metodología más adecuada para determinar la velocidad de propagación de las ondas en materiales en laboratorio. En este proceso se comprendió el funcionamiento de los equipos y su forma de aplicación. Además se determinaron los parámetros más adecuados para realizar los ensayos sónicos y ultrasónicos.

Una vez entendido y aplicado el método para obtener la velocidad en un punto de un material se construyeron muros de prueba en laboratorio para obtener imágenes tomográficas aplicando ensayos sónicos y ultrasónicos.

Se replicaron ensayos sónicos y ultrasónicos en dos construcciones patrimoniales. En Huaca de la Luna se estudió el material en laboratorio para determinar sus propiedades mecánicas mediante ensayos de ultrasonido. Además se construyeron imágenes tomográficas de algunos subelementos estructurales de Huaca de la Luna y de la iglesia de Andahuaylillas.

1.4 Organización de la Tesis

La tesis está organizada en siete capítulos de la siguiente manera:

Capítulo 1: Abarca la introducción de la tesis, la motivación, objetivos y la metodología.

Capítulo 2: Se presenta un breve marco teórico de la aplicación de ensayos sónicos y de ultrasonido. Se describen diferentes formas de determinar el tiempo de propagación de las ondas a través de un material. Se presenta también que es una tomografía generada a partir de ensayos sónicos directos y como estas imágenes se han utilizado en diversos casos de estudio.

Capítulo 3: Se muestran los resultados de la aplicación de ensayos sónicos y ultrasónicos en diferentes materiales. Con esos resultados se evaluó la técnica más

apropiada para determinar el tiempo de propagación de la onda entre el emisor y el receptor.

Capítulo 4: En este capítulo se aplicó la metodología para obtener tomografías de muros de albañilería. Se construyeron dos muros para su estudio y se generaron tomografías utilizando las velocidades calculadas en diversos puntos de los muros elaborados. Finalmente se validó la metodología mediante la interpretación de las tomografías obtenidas y la comparación de los resultados con el estado real de los muros.

Capítulo 5: Se presenta el estudio de caracterización mecánica de las unidades de Adobe del complejo arqueológico Huaca de la Luna mediante ensayos de ultrasonido. Los datos fueron tomados en laboratorio de un grupo de adobes provenientes de Huaca de la Luna. Se obtuvieron propiedades mecánicas tales como módulo de elasticidad y módulo de poisson a partir de las velocidades registradas utilizando ultrasonido. Así mismo se construyeron tomografías ultrasónicas de todos los adobes en estudio para determinar la homogeneidad del material así como su estado interno. Se presentan los resultados de la aplicación de sónicos para obtener tomografías de 5 columnas de este complejo arqueológico. Finalmente se determinó la distribución de las unidades de adobe en el interior de las columnas mediante un análisis de Impacto eco.

Capítulo 6: En este capítulo se reporta la aplicación de ensayos sónicos en la iglesia de Andahuaylillas. Estos ensayos tuvieron como fin obtener imágenes tomográficas de uno de sus contrafuertes y un muro de sus capillas. Con estos resultados se determinó el estado actual de estos elementos estructurales.

Capítulo 7: Se presentan las conclusiones de la tesis y se proponen trabajos futuros que complementen esta investigación.

1.5 Resultados

A partir de esta investigación se redactaron las siguientes publicaciones que han sido aceptadas en conferencias internacionales arbitradas.

Aguilar, R., Saucedo, C., Montesinos, M., Ramirez, E., Morales, R., & Uceda, S. (2015). Caracterización mecánica de las unidades de adobe del complejo arqueológico Huaca de la Luna mediante ensayos de Ultrasonido. *Proceeding of the XXVth Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, 9-13 Noviembre 2015*, Cuenca, Ecuador.

Aguilar, R.; Montesinos, M.; López, S., Saucedo, C., Ramírez, E.; Zavala, G.; Pando, M.; Morales, R. & Uceda, S. (2016), Geotechnical and structural testing in an archaeological massive earthen pyramid: Huaca de la Luna. *Proceeding of the XIIth World Congress on Earth Architecture (TERRA-2016), 11-14 July 2016*. Lyon, France. (Revision).

Capítulo 2

Ensayos para estudiar la propagación de ondas en un medio: Revisión de la literatura.

Resumen

En este capítulo se presentan diversas metodologías para determinar la velocidad de propagación de ondas en materiales a través de ensayos sónicos, de ultrasonido y de Impacto eco. Se propone además una metodología diferente la cual consiste filtrar las señales sónicas y luego medir el tiempo de viaje de la onda P. Se muestra también que es una tomografía, estudios anteriores y como pueden ser creadas a partir de velocidades.

2.1 Introducción

En los últimos años se vienen utilizando técnicas innovadoras y de carácter no destructivo en el estudio de las propiedades mecánicas y del estado interno de los materiales que conforman una estructura (McCann & Forde, 2001). En este capítulo se presentan los ensayos sónicos, ultrasónicos y de Impacto eco los cuales miden la velocidad de propagación de las ondas en un material. Determinar este valor se puede hacer mediante diferentes metodologías como las de diferencia de tiempos e Impacto eco. Estas técnicas y la propuesta de una nueva metodología son tratadas en este capítulo.

2.2 Propagación de ondas en un medio

2.2.1 Ensayos sónicos

Los ensayos sónicos permiten evaluar las propiedades mecánicas, encontrar defectos, tales como grietas, y determinar la homogeneidad de los materiales de construcción. Esto se realiza utilizando las variaciones de velocidad de las ondas y la atenuación de estas (Colla, et al., 2010).

Los métodos sónicos se basan en la generación de ondas mecánicas de baja frecuencia (frecuencias menores a 20 kHz) mediante un martillo instrumentado o un martillo calibrado. Los martillos suministran una masa cayendo de una determinada distancia, por lo que la masa y la dureza de la cabeza del mismo definen la energía y la frecuencia de la onda inicial. La onda mecánica es recogida por un receptor que puede situarse en varias posiciones (Lombillo, Thomas, Villegas, Fernandez, & Norambuena, 2013).

Existen tres tipos de configuraciones para la realización de ensayos sónicos. Ensayos directos si el emisor y el receptor se encuentran en lados opuestos y paralelos. Indirectos si ambos se ubican en la misma superficie y ensayos semi-directos cuando el emisor y receptor se encuentran en superficies adyacentes y perpendiculares. Estos tres tipos de configuraciones se pueden ver en la Figura 2.1.

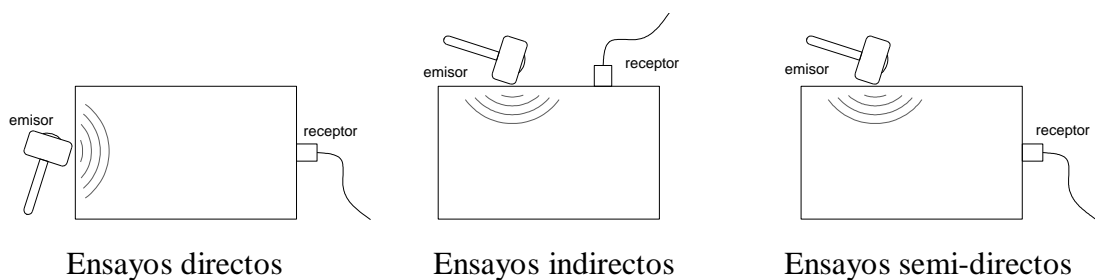


Figura 2.1 Tipos de configuraciones de ensayos sónicos. Adaptado de Miranda et al (2013)

Dependiendo de la configuración empleada, existen tipos de ondas que son estudiadas de una manera más fácil. La propagación de las ondas mecánicas en un sólido se lleva a cabo de tres maneras: mediante ondas P (compresión), ondas S (corte) y ondas R (Rayleigh) (Ver Figura 2.2). Las ondas P son ondas longitudinales que atraviesan el sólido. Como se ve en la Figura 2.3a, este tipo de onda desplaza las partículas del material a lo largo de la dirección de propagación de la onda. Para su estudio se pueden emplear ensayos sónicos directos e

indirectos. Las ondas S son ondas de corte y desplazan a las partículas en forma perpendicular a la dirección de viaje de la onda (Ver Figura 2.3b). Para su evaluación se recomienda emplear ensayos sísmicos semi-directos. Finalmente en la Figura 2.3c se muestran las ondas R. Estas ondas no penetran el elemento y se propagan a lo largo de su superficie. Este tipo de ondas se pueden analizar al aplicar ensayos sísmicos indirectos (Miranda, Cantini, Guedes, Binda, & Costa, 2013).

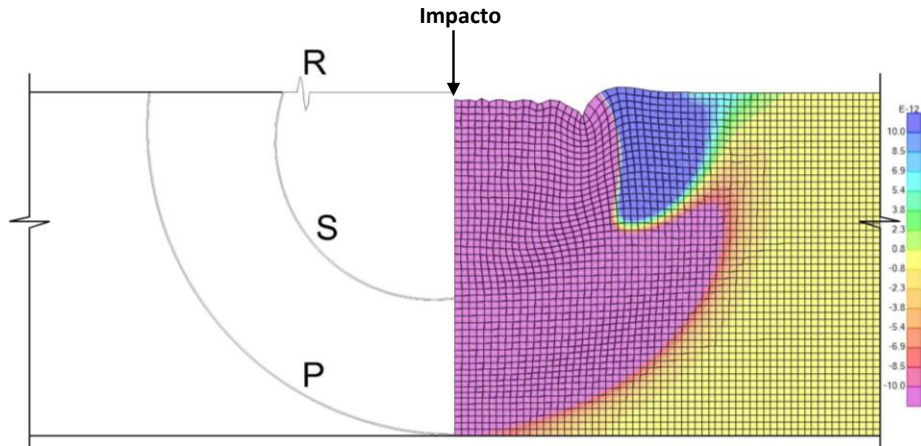


Figura 2.2 Modelo de elementos finitos de la propagación de ondas en un medio. Adaptado de (Sansalone, Carino, & Hsu, 1987)

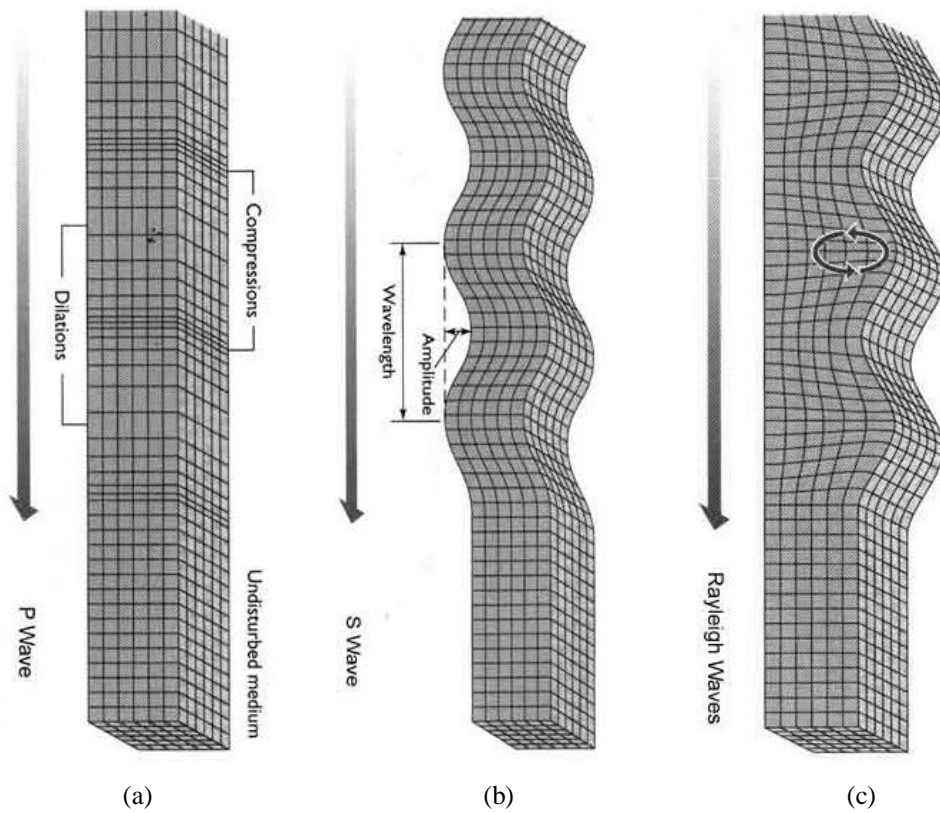


Figura 2.3 Tipos de ondas en un material (a) ondas longitudinales, P (b) ondas de corte, S (c) ondas superficiales, R. Adaptado de (Domus, 2014)

A continuación se presentan tres técnicas para determinar la velocidad de ondas P utilizando ensayos sónicos directos. Cada técnica se diferencia en la forma de calcular el tiempo de viaje (Δt) a través del material.

2.2.1.1 Cálculo de Δt al inicio de cada señal

En este método se ha calculado el tiempo de propagación de ondas P en el dominio del tiempo. Esto se muestra en la Figura 2.4.

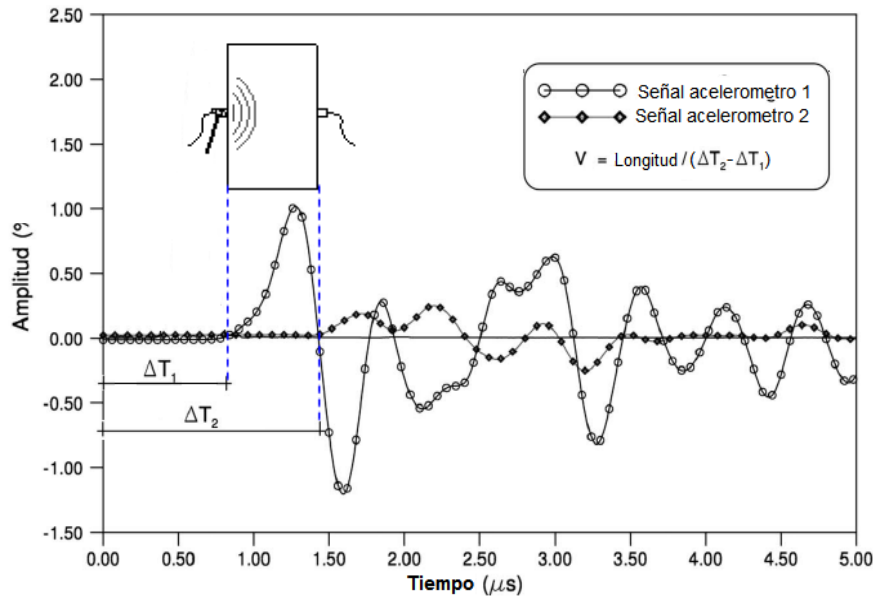


Figura 2.4 Diferencia de tiempo de dos señales adquiridas en cada receptor. Adaptado de (Miranda, Cantini, Guedes, Binda, & Costa, 2013)

Como se puede ver en la Figura 2.4 el tiempo es calculado por simple diferencia. Conocida la longitud en estudio se puede determinar la velocidad de la Onda P tal como se muestra en la ecuación (1):

$$V_P = \frac{L}{\Delta t} \quad (1)$$

En la ecuación (1) V_P representa la velocidad de propagación a través del material de la onda P expresado en [m/s]. La longitud de recorrido está representada por L en [m], mientras que Δt es el tiempo en [s] que demora en atravesar la onda el material.

2.2.1.2 Diferencia de picos de señales filtradas

Se propone determinar Δt filtrando las señales adquiridas. Esto es eliminar frecuencias bajas y altas respecto de la frecuencia predominante. Esta frecuencia está relacionada directamente a la frecuencia de reflexión de la onda P, por lo que se estaría eliminando la onda S y onda R. Luego por diferencia de un cierto número de picos (N) de las señales del punto emisor y receptor se puede obtener el promedio de Δt para cada registro. En la Figura 2.5 se puede ver la metodología propuesta.

En base a los ensayos realizados el valor de N es de 10 para muestras de adobe, 15 en ladrillo, 30 en concreto y 20 en Cantería.

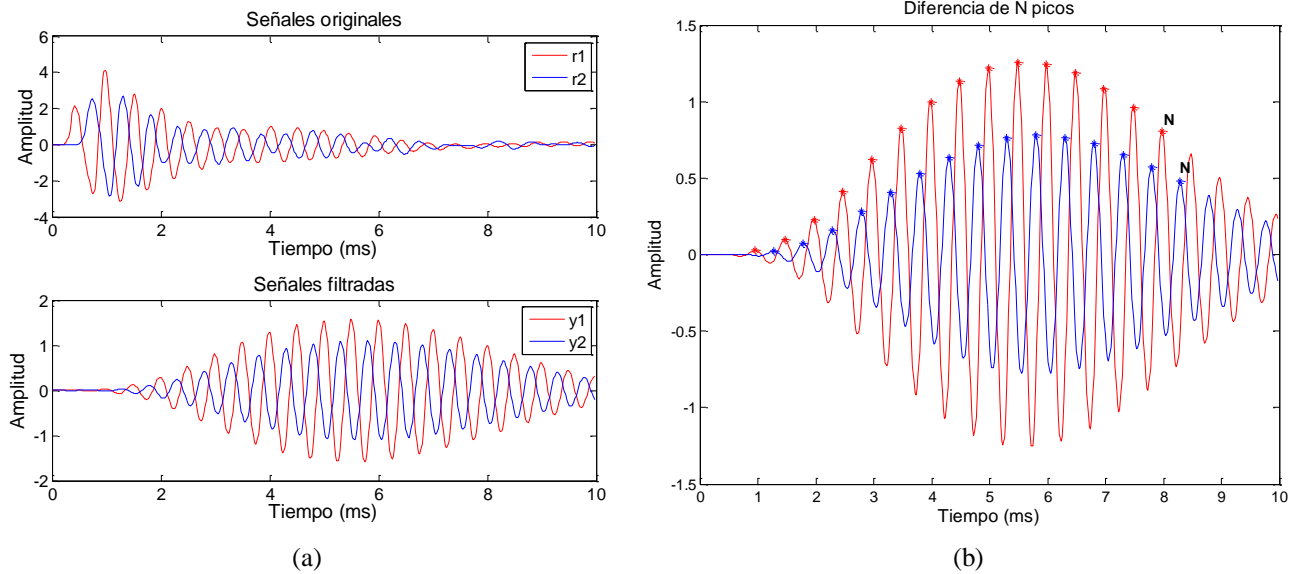


Figura 2.5 Metodología propuesta (a) Señales originales y filtradas (b) Diferencia de N picos de la señal filtrada.

Para el filtrado de las señales se ha hecho uso de un filtro pasa-banda. Dentro de este filtro se pueden encontrar 4 tipos de filtros: Butterworth, Chebyshev tipo 1, Chebyshev tipo 2 y Elíptico. Se han analizado los datos utilizando los 4 tipos de filtros siendo el filtro Elíptico el que presenta un menor Coeficiente de Variación (CV) en los resultados. Además este tipo de filtro es el que tiene mejores características debido a una mayor atenuación de las frecuencias eliminadas (Ingle & Proakis, 2012)

Para el diseño del filtro pasabanda se ha utilizado como parámetro principal la frecuencia predominante (F_{\max}) de cada señal adquirida. Las frecuencias de corte W_{s1} y W_{s2} fueron $0.25F_{\max}$ y $2F_{\max}$ respectivamente. Las frecuencias de paso W_{p1} y W_{p2} fueron $F_{\max} - 100\text{Hz}$ y $F_{\max} + 100\text{Hz}$ respectivamente. La atenuación en la banda de paso (R_p) y en las bandas de corte (R_s) fue de 3 dB y 60 dB como se puede ver en la Figura 2.6.

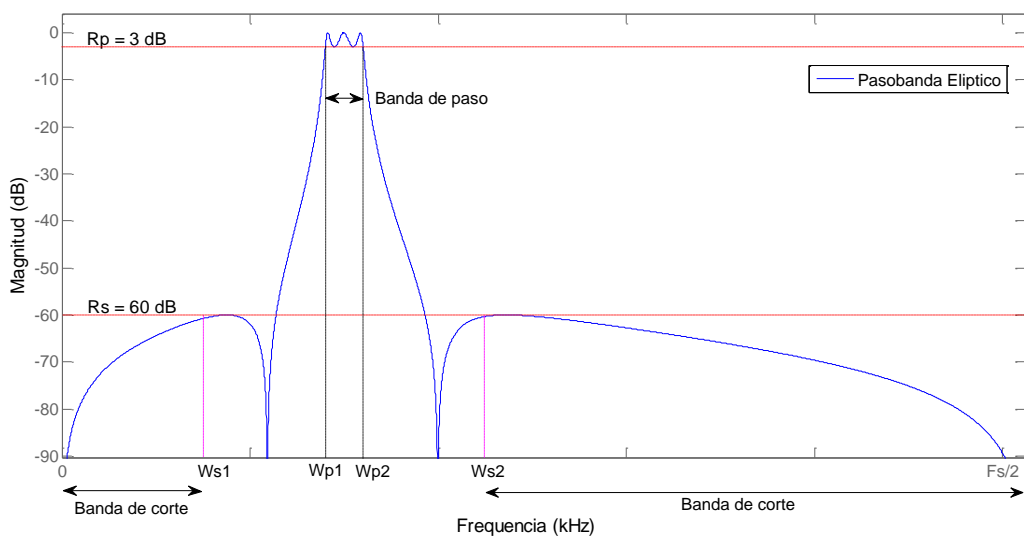


Figura 2.6 Parámetros de diseño de un filtro pasabanda tipo elíptico.

2.2.2 Ensayos de Ultrasonido

La prueba de ultrasonido es un ensayo no destructivo, el cual permite medir la velocidad de propagación de una onda en un material así como detectar la existencia de defectos internos. En este ensayo, una onda con un contenido de frecuencias mayor a 20kHz es producida por un transductor ultrasónico. La onda viaja a través del material y finalmente es detectado por un receptor como se muestra en la Figura 2.7a. El camino que recorre la onda provee de información acerca del elemento el cual se está ensayando. Específicamente, la velocidad de la onda está en función de las propiedades del material tales como módulo de elasticidad, densidad y módulo de poisson (Krautkramer & Krautkramer, 1990).

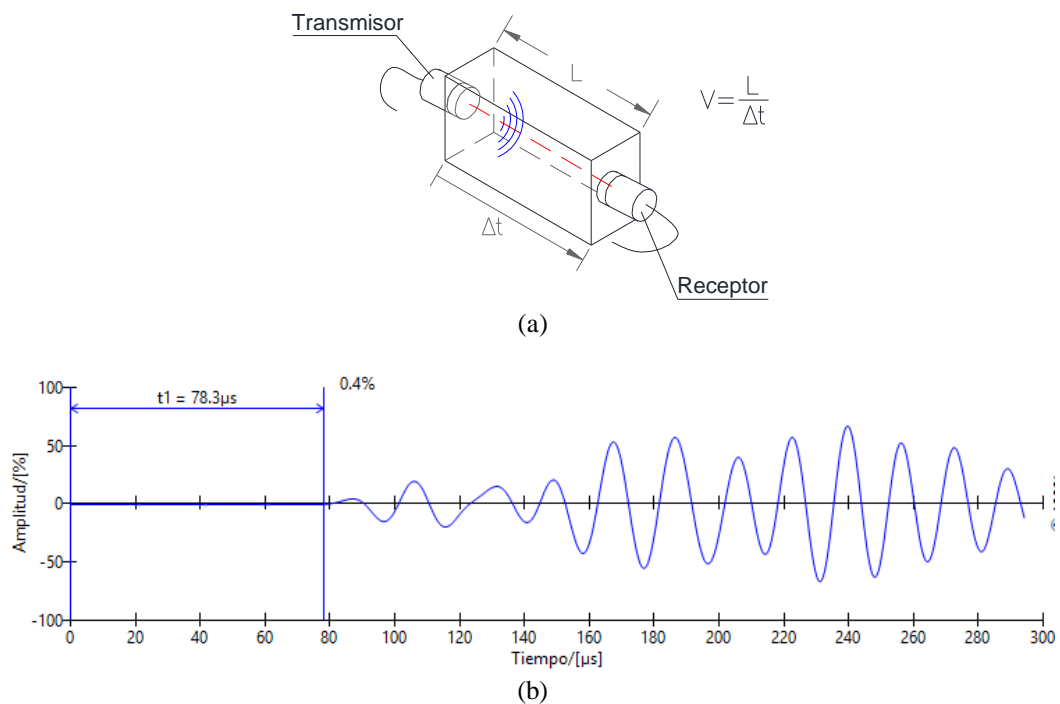


Figura 2.7 Ensayo de ultrasonido (a) Configuración de ensayo (b) Señal adquirida.

La propagación de ondas mecánicas producidas por un pulso ultrasónico a través de un material se llevan a cabo de dos maneras: mediante ondas P y S. A diferencia de las pruebas sónicas, en este ensayo las ondas R son imperceptibles. Las ondas P y S tienen el mismo comportamiento que en los ensayos sónicos.

La velocidad de la onda P y S se calcula dividiendo la longitud de recorrido entre el tiempo que toma en llegar al receptor en el extremo opuesto (Ver Figura 2.7a), tal como se muestra en la ecuación (3).

$$V_{P,S} = \frac{L}{t_{P,S}} \quad (3)$$

En la ecuación (3) V_p y V_s representan la velocidad de propagación a través del material de la onda P y S expresados en [m/s]. La longitud de recorrido está representada por L en [m], mientras que t_p y t_s es el tiempo en [s] que demora en atravesar la onda el material. Complementariamente, las ecuaciones (4) y (5) consideran que las ondas P y S atraviesan

un sólido elástico isotrópico y por lo tanto es posible establecer una relación de la velocidad con el módulo de elasticidad dinámico, densidad y módulo de Poisson (Krautkramer; Krautkramer, 1990). En estas ecuaciones el módulo de elasticidad dinámico (E_d) está expresado en $[N/m^2]$, la densidad (ρ) en $[kg/m^3]$ y el módulo de Poisson (ν) es adimensional. Finalmente, si V_p y V_s son conocidas, el módulo de Poisson se puede estimar con la ecuación (6).

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E_d}{\rho 2(1+\nu)}} \quad (5)$$

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (6)$$

Determinar de manera precisa el tiempo de propagación de la onda es de vital importancia en el ensayo de ultrasonido. Cuando este tiempo es hallado de forma manual existe un grado de incertidumbre en el punto exacto de llegada de la onda ultrasónica. Existen casos particulares donde es posible considerar diferentes estimaciones del tiempo de arribo de la onda en la señal adquirida (Granja, 2011). Por lo tanto el tiempo de propagación varía en función de la experiencia y conocimiento del operador ya que la elección del punto exacto se lleva a cabo de manera subjetiva (Viana da Fonseca, Ferreira, & Fahey, 2009).

La amplitud de la onda es mayor cuando atraviesa un material con menor cantidad de defectos. Si se combinan las mediciones de velocidad y amplitud de la onda se puede incrementar la sensibilidad de la técnica ultrasónica para detectar heterogeneidades (Liang, et al., 2013).

2.2.3 Impacto-eco

Otra técnica conocida para calcular la velocidad de la onda P es la de Impacto-eco. Esta emplea un análisis basado en la frecuencia de los ecos de las ondas que se propagan dentro de un material. Cuando una onda P está atravesando un material y llega a un material diferente, parte de la onda P es reflejada, esto se explica por el principio de impedancia acústica (Sansalone & Streett, 1997). La impedancia es el producto de la velocidad y de la densidad del material. Las muestras en estudio están compuestas únicamente por un solo material por lo que la diferencia de impedancias con respecto al aire es muy elevado y se originan las reflexiones.

Cuando las ondas reflejadas o ecos retornan a la superficie producen desplazamientos que son medidos por un transductor receptor. Si el receptor está situado próximo al punto de impacto la respuesta está dominada por los ecos de las ondas P (Carino, 2001). En la Figura 2.8 se observa que las múltiples reflexiones de la onda P entre la parte superior y la inferior

de la placa generan una periodicidad en la superficie del elemento. En esta técnica se utiliza un análisis en el dominio de las frecuencias de los desplazamientos medidos en la superficie para determinar las reflexiones de la onda P.

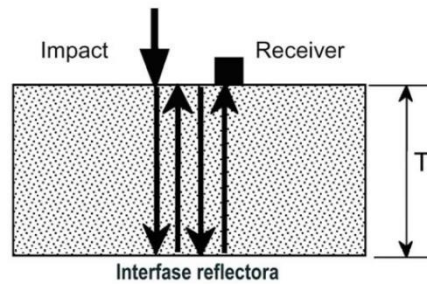


Figura 2.8 Reflexiones de la Onda P en material. Adaptado de Carino J. (2001).

Como se puede ver en la Figura 2.8, la distancia de ida y vuelta recorrida por la onda es $2T$, donde T es la distancia entre la superficie y la interface reflectora. En Sansalone et al (1997), la ecuación que relaciona la frecuencia de las reflexiones con la velocidad de la onda P y el espesor del material es:

$$T = \frac{\beta V_p}{2f} \quad (2)$$

En donde V_p es la velocidad de la onda P [m/s]; f es la frecuencia de las reflexiones de la onda P [Hz]; T es el espesor del material [m]. Estudios muy rigurosos llevados a cabo por Sansalone et al (1997).han determinado que la velocidad asociada a la frecuencia de las muestras es afectada por el factor de forma β . Este coeficiente tiene un valor de 0.96 para elementos como placas o muros en donde el espesor T es menor a las otras dimensiones o en elementos donde la longitud de propagación es mayor a dos veces uno de sus lados.

Para determinar la frecuencia (f), se emplea el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT). Esta técnica consiste en presentar en el dominio de las frecuencias un registro de datos tomado en el dominio del tiempo (Cooley & Tukey, 1965). En este tipo de gráfico se puede ver el contenido de frecuencias predominantes tal como se muestra en la Figura 2.9. En esta figura la señal adquirida se presenta en color azul en la parte derecha y de color negro su contenido de frecuencias siendo f [Hz] la frecuencia predominante.

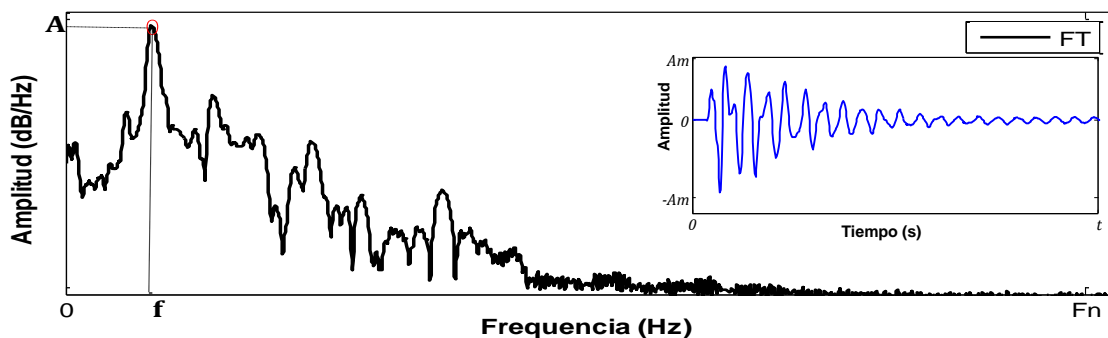


Figura 2.9 Transformada de Fourier de un registro de datos.

2.3 Construcción de Tomografías

Como se vio anteriormente, la velocidad de propagación de las ondas es un medio se obtiene a partir de la medición del tiempo que toma para cubrir la distancia entre el emisor y el receptor. Obtener las velocidades en diversos puntos del elemento estructural hace posible crear una imagen de velocidades, a lo cual se le conoce como tomografía.

Una tomografía es una herramienta que genera una representación en dos o tres dimensiones de las características físicas de un sólido. Reproduce la estructura interna de un elemento a partir de mediciones recogidas en su superficie externa (Binda, et al., 2003b).

En la guía técnica (ONSITEFORMASONRY, 2004) se describen los métodos para obtener las velocidades sónicas las cuales son: método directo, indirecto y semi-directo. En el método directo la onda de tensión viaja a través del espesor del muro de albañilería. Los puntos de emisión y recepción de la onda se encuentran en caras opuestas, en línea recta y a la misma altura. En los métodos indirectos el punto emisor y receptor de la onda se encuentran en la misma cara del muro. Este método generalmente se utiliza cuando no se tiene acceso al otro lado del muro. Finalmente en los métodos semi-directos existe un ángulo de inclinación entre el emisor y receptor y se pueden encontrar en lados opuestos o en lados perpendiculares. En la Figura 2.10 se observa la ubicación del receptor y el emisor de los tres métodos descritos.

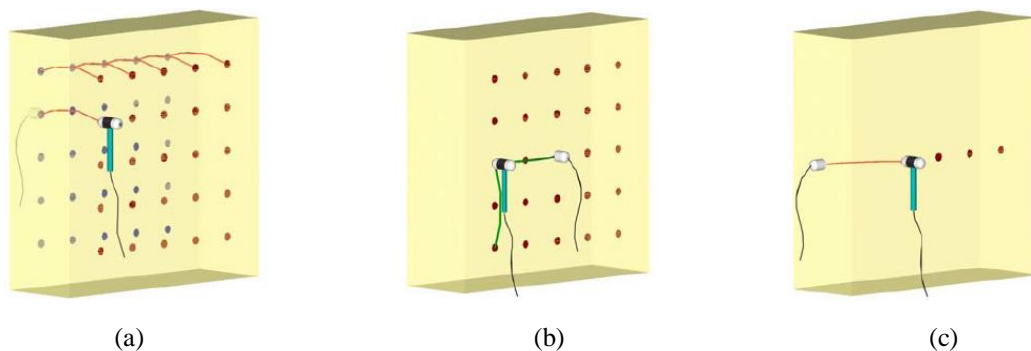


Figura 2.10 Esquema de los métodos para determinar las velocidades sónicas en muros.(a) Métodos directos (b) Metodos indirectos (c) Métodos sem-directos. Adaptado de (ONSITEFORMASONRY, 2004)

Obtener una tomografía implica conocer dos cosas: la geometría del elemento en estudio y la velocidad de la onda en ciertos puntos del elemento. Para ello utilizando la metodología directa se elaboran mallas cuadradas o rectangulares en ambas caras del elemento en estudio tal como se ve en la Figura 2.11a. El número de filas y columnas y el espaciamiento entre ellas dependen principalmente del objetivo de la investigación.

Una vez dibujada la malla se obtienen las velocidades en dichos puntos aplicando ensayos sónicos o ultrasónicos. Luego estos valores se presentan en un mapa de velocidades con una escala a colores como en la Figura 2.11b. En este tipo de imágenes dependiendo de la cantidad de puntos de la malla se pueden identificar heterogeneidades en el elemento en estudio. Velocidades bajas indican la presencia de posibles grietas o vacíos internos. En

cambio velocidades altas pueden indicar una mayor aglomeración del material o que se encuentra en mejor estado (ONSITEFORMASONRY, 2004).

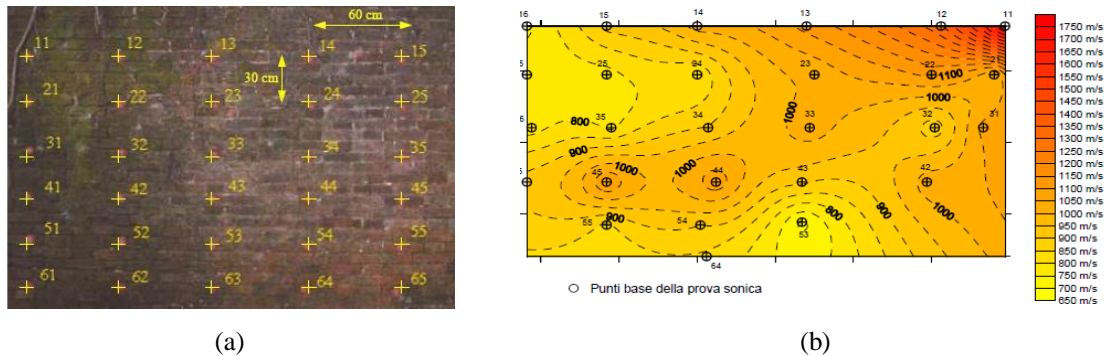


Figura 2.11 Tomografía mediante la aplicación de ensayos sísmicos directos (a) Malla rectangular de 0.60x0.30 m (b) Imagen de velocidades en 2D.

Diversas investigaciones muestran la utilidad de estos ensayos para la conservación de monumentos históricos. Tal es el caso de Binda et al. (2003b) quienes estudiaron en Milán, Italia, la Catedral de Noto que fue dañada por un sismo en 1996. En la iglesia se habían ejecutado algunas reparaciones en sus elementos estructurales, por lo que el objetivo del estudio fue verificar las reparaciones de los muros y pilares de la de la catedral así como su estado de daño. Los ensayos sísmicos fueron utilizados para controlar el efecto de la inyección de lechada de cemento como una técnica de reparación. Se realizaron ensayos de ultrasonido a dos tipos de piedras para calcular sus velocidades de propagación de ondas. De la misma manera se realizó en los pilares, aquí se determinó que se habían utilizado diferentes tipos de piedras en su construcción por la variación de las velocidades obtenidas a diferentes alturas. También se logró determinar el estado de daño de los pilares por las bajas velocidades obtenidas debido a la gran cantidad de grietas. Las pruebas realizadas en los muros de mampostería dieron resultados similares a los obtenidos en los pilares. También en este caso se observó que la velocidad disminuye a lo largo de la altura de la pared. Luego se aplicaron inyecciones de grouting a algunas de las estructuras colapsadas y se esperó 28 días para su estudio. Los ensayos sísmicos revelaron un incremento de la velocidad de onda en las estructuras y se concluyó que se habían realizado reparaciones óptimas.

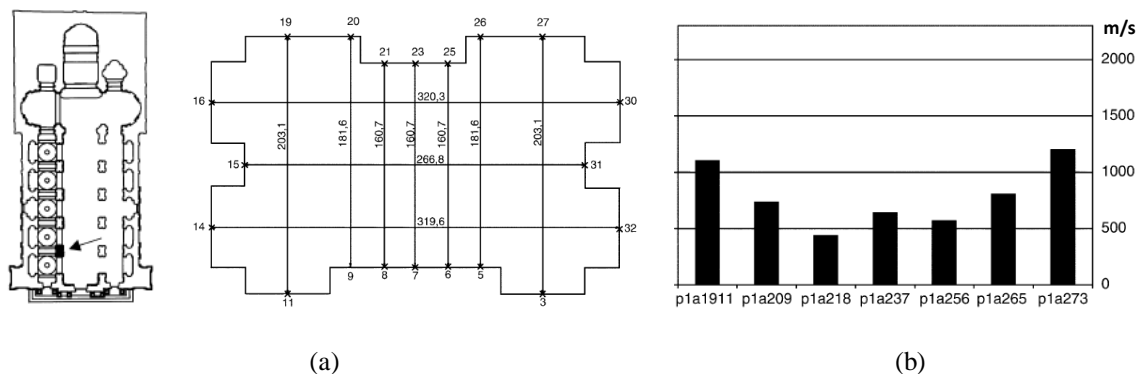


Figura 2.12 Ensayos sísmicos directos en una columna de la Catedral de Noto (a) sección de columna (b) velocidades calculadas. Adaptado de (Binda, et al., 2003b)

En Italia, el templo de S. Nicolo fue afectado por un terremoto en 1990. La cúpula y las bóvedas fueron dañadas y en sus pilares se encontraron grietas verticales. Binda et al (2003a) dedujeron que los pilares posiblemente eran parte de la estructura original. La investigación realizada estuvo orientada a la planificación y diseño de acciones de conservación y restauración. Se emplearon ensayos sónicos como el de tomografía sónica para obtener información acerca de la morfología de los pilares dañados. La aplicación de esta técnica permitió crear imágenes en 2D de las velocidades de onda en la sección del elemento en estudio. Se realizaron 28 tomografías, 18 horizontales y 10 verticales. Los resultados mostraron que en la base y en la parte alta de los pilares había mayores velocidades que en la parte media. Esto confirmaba la presencia de grietas y que inmediatamente se tenían que realizar acciones de conservación.

Se sabe que una de las aplicaciones de los ensayos sónicos es controlar la efectividad de reparaciones hechas por inyección. En este campo, Valluzzi et al (2009) construyeron dos estructuras simples de piedra de dos pisos, similares a las construcciones del centro histórico de la ciudades del noreste de Italia. Su objetivo fue estudiar la influencia de la inyección de lechada de cal en el comportamiento de la estructura. Uno de los dos modelos fue inyectado previamente antes de ponerlo a prueba en una mesa vibratoria en laboratorio. Los resultados fueron comparados con el otro muro que no fue inyectado. Previamente, en ambas estructuras se realizaron cuatro pruebas sónicas directas y dos de tomografía en los mismos puntos de ambas. Los ensayos sónicos fueron realizados en primera instancia para determinar las zonas donde se iba a realizar las inyecciones y además observar la presencia de huecos en los muros. Las velocidades obtenidas estuvieron en el rango de 1000 a 2000 m/s lo que indicó la presencia de muchos vacíos en los muros. Después de realizada la inyección las velocidades calculadas fueron de 2200 m/s a 2900 m/s. Este hecho indicó que se había mejorado la calidad de la albañilería y además se lograron disminuir los vacíos en los muros utilizando las inyecciones.

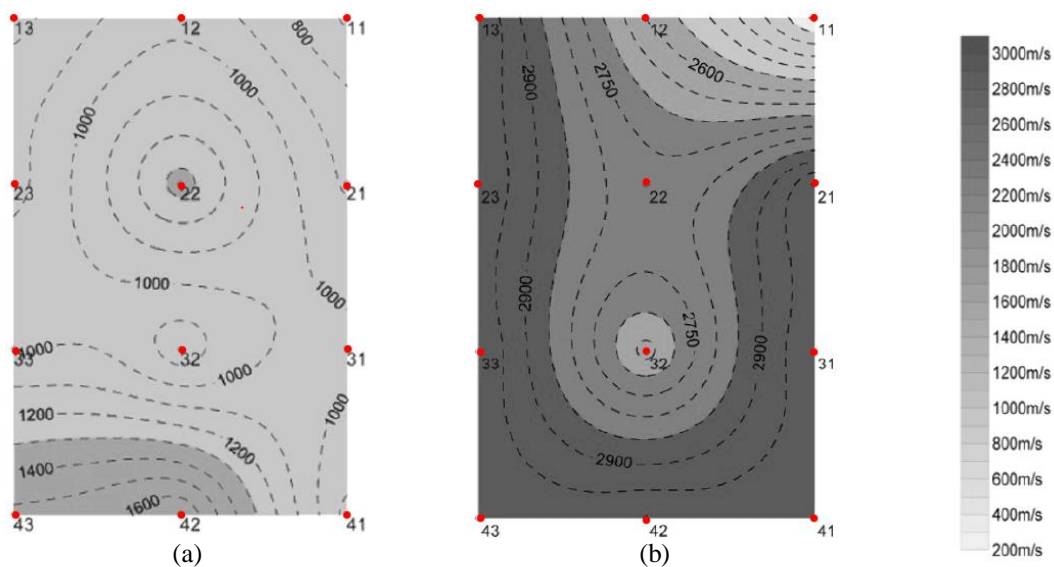


Figura 2.13 Tomografías sónicas directas (a) antes y (b) después de la inyección. .Adaptado de (Valluzzi, Mazzon, Munari, Casarin, & Modena, 2009)

Al igual que los casos anteriores, muchas de las aplicaciones han sido desarrolladas en Italia. Otro caso de estudio fue hecho por Cappabianca et al. (2008) en el Obelisco de San Giovanni. En este monumento se ejecutaron ensayos sónicos directos e indirectos. El objetivo de la investigación fue definir las propiedades mecánicas de la piedra y obtener el módulo de elasticidad. Las pruebas se llevaron a cabo en cuatro secciones diferentes y se encontraron diferentes zonas por las variaciones en sus velocidades. Estas zonas encontradas se deben a que el obelisco había sido restaurado anteriormente utilizando otros materiales, en las tomografías se observaron grietas, y estas existían a diferentes alturas en el obelisco, en la base, parte media y en la parte alta del monumento.

En 2006, Liberatore et al. llevaron a cabo diversas investigaciones en las construcciones de adobe de Aliano en Italia. Entre una de ellas fue el uso de ensayos sónicos en muros. Se ensayaron tres tipos de muros: un muro de adobe, un muro de adobe con una cara de sillar, y un muro de sillar. En los muros de adobe las velocidades encontradas variaban de 130 a 640 m/s. La desviación estándar era alta e indicaba una no homogeneidad en el muro, posiblemente por la presencia de vacíos internos en los puntos donde la velocidad era baja. En el muro de adobe y sillar las velocidades fueron menores a 150 m/s debido a que el grado de conexión entre el adobe y el sillar era pobre. Por último en el muro de sillar las velocidades encontradas fueron en promedio de 1100 m/s. La separación entre el adobe y el sillar fue observado y confirmado con la utilización de los ensayos sónicos.



Figura 2.14 Muros de las construcciones de Aliano (a) adobe (b) adobe y sillar. Adaptado de (Liberatore, et al., 2006)

Recientemente en 2013, Casarin et al. realizaron una investigación en dos estructuras históricas: la catedral de Reggio Emilia y el campanario de la basílica San Zeno en Verona. Los resultados obtenidos de los ensayos sónicos fueron utilizados para calibrar los modelos estructurales que se utilizaron para identificar el comportamiento mecánico de las estructuras. En la catedral de Regio Emilia, el objetivo principal de la investigación sónica fue definir cualitativamente las condiciones de la mampostería en los puntos estudiados. Las velocidades obtenidas fueron mayores a los 800 m/s con un promedio de 1394 m/s de un total de 349 mediciones. Con estos datos se pudo considerar a las partes seleccionadas de mampostería como cuerpos rígidos ya que no indicaban deficiencias estructurales graves. En la basílica de San Zeno se ejecutaron estos ensayos en su torre principal, la cual fue construida en 1045 DC. En este caso las tomografías sónicas obtenidas fueron referencia para evaluar la composición interna de las columnas del campanario. Se construyeron tomografías sónicas en las columnas de los dos últimos niveles del campanario y se

determinó que estaban compuestas internamente por materiales diferentes. En las zonas internas y externas se obtuvo un promedio de 1800 m/s. En las zonas bajas 2500 m/s y en las partes altas velocidades de 1600 y 2600m/s fueron calculadas. Los resultados fueron corroborados con la extracción de muestras del núcleo en las áreas donde se efectuaron los ensayos.

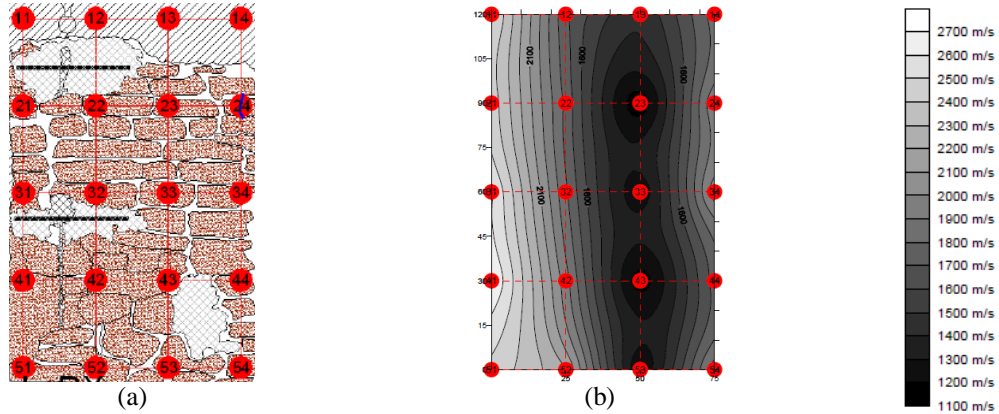


Figura 2.15 Ensayos sónicos directos en la Catedral de Reggio Emilia (a) malla de adquisición (b) velocidades calculadas. Adaptado de (Casarin, Valluzi, da Porto, & Modena, 2013)

En el estudio de los muros de mampostería en el palacio Riva-Herrera (Lombillo, et al., 2013), se aplicaron ensayos sónicos indirectos con el equipo TDAS-16. Su objetivo era determinar la distribución interna de los materiales en los muros por medio de la técnica de Impacto eco. La metodología empleada fue de la siguiente manera: las señales adquiridas fueron procesadas en el dominio de las frecuencias. Por medio de la transformada de Fourier se obtuvo un espectro de frecuencias y se logró identificar tres frecuencias predominantes. Ensayos de ultrasonido se efectuaron para determinar la velocidad de propagación de las ondas en diferentes tipos de rocas que estaban presentes en la estructura. Con estas velocidades y las frecuencias identificadas se determinó que existían tres capas de rocas que conformaban los muros. Los resultados obtenidos fueron verificados en una parte del muro que estaba dañado por lo que las capas fueron visibles tal como se ve en la Figura 2.16.

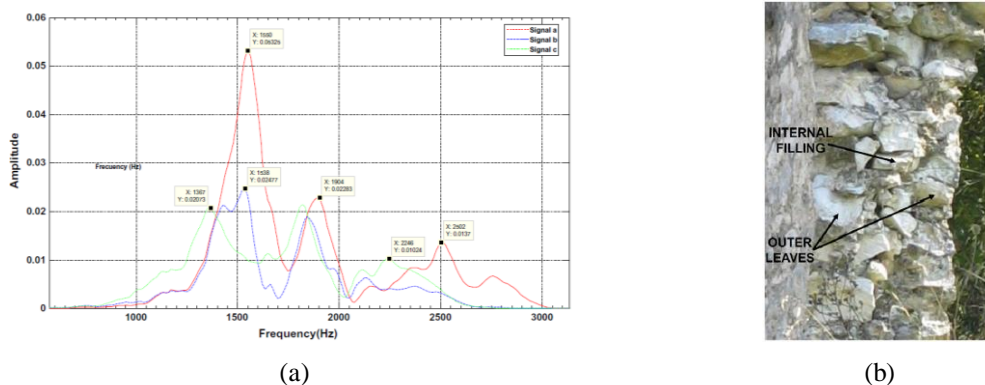


Figura 2.16 Ensayos sónicos en el palacio Riva-Herrera (a) Señales en el dominio de las frecuencias (b) Capas de piedras en los muros. Adaptado de (Lombillo et al., 2013)

Capítulo 3

Ensayos sónicos, ultrasónicos y de Impacto eco aplicados para el estudio de materiales

Resumen

El siguiente capítulo se presenta los resultados de la aplicación de ensayos sónicos, ultrasónicos y de Impacto eco en diferentes materiales para determinar la velocidad de onda P. En esta etapa se ensayaron en 5 muestras de adobe, ladrillo, concreto, roca y cantería. Se procesaron los registros obtenidos de los ensayos sónicos mediante dos metodologías: diferencia de tiempo al inicio de cada señal y diferencia de picos por filtrado de señales. Esta última es una nueva metodología propuesta. Luego se ejecutaron ensayos de ultrasonido en los mismos puntos donde se realizaron las pruebas sónicas. Finalmente se analizaron los registros obtenidos en los ensayos sónicos utilizando la metodología de Impacto eco para determinar la velocidad de la onda P. Los resultados de los ensayos de ultrasonido fueron los más confiables debido a la naturaleza de los mismos y sirvieron como base de comparación con los resultados de los ensayos sónicos y de Impacto-eco.

3.1 Introducción

Crear una imagen tomográfica a partir de las velocidades calculadas en diversos puntos conlleva a calcular la velocidad en cada uno de sus puntos de la manera más adecuada y confiable. Es por eso que determinar la velocidad de propagación de las ondas mecánicas a través de un material es el objetivo principal de este capítulo. Las técnicas y metodologías descritas en el capítulo anterior son aplicadas en muestras de diferentes materiales. Estos materiales tales como el adobe, piedra, ladrillo, cantería e incluso el concreto son parte de construcciones patrimoniales ya sea desde su construcción o como medida de reparación. En este capítulo se describe el equipo empleado para cada una de las técnicas y como se realiza el procesamiento de los datos. Finalmente se presentan los resultados de todas las técnicas descritas y la evaluación de la metodología más apropiada para los trabajos subsiguientes.

3.2 Descripción del Sistema.

En una primera etapa se decidió realizar ensayos sónicos, ultrasónicos y de impacto eco en diferentes materiales. Se seleccionó adobe, ladrillo, concreto, cantería y piedra como materiales a evaluar debido a que forman parte de las estructuras históricas del país. Así mismo esta etapa ayudó a familiarizarse con el uso de ensayos sónicos y ultrasónicos para determinar la velocidad de onda P en los puntos en estudio.

3.2.1 Equipo empleado

Los ensayos sónicos se ejecutaron empleado un martillo de acero no instrumentado. Los receptores son dos acelerómetros piezoeléctricos con una respuesta de hasta 15 kHz. Los acelerómetros fueron acoplados a las muestras utilizando un material plástico adhesivo para una mejor transmisión de la señal. El equipo adquisidor de datos (DAQ) fue un NI-9234 con una resolución de 24 bits y una máxima frecuencia de muestreo de 51.2 kHz. Se ha utilizado el software Sonic Acq V1.0 para obtener los registros de cada prueba. (Ver Figura 3.1a)

Para los ensayos ultrasónicos se utilizó el equipo de medición PunditLab+. La frecuencia de muestreo a la cual se registraron las señales fue de 2 MHz con lo se tiene una aproximación en el tiempo a 0.5 μ s. Se utilizaron transductores de 54 kHz para evaluar la velocidad de onda P. Siguiendo las recomendaciones de la norma (ASTM C597, 2009) se utilizó gel acoplante para mejorar el registro. (Ver Figura 3.1b)



(a)



(b)

Figura 3.1 Equipos de medición (a) Sónicos (b) Ultrasónicos

3.2.2 Características de las muestras

Los ensayos fueron llevados a cabo en cinco especímenes de adobe, ladrillo, concreto, cantería y piedra tal como se puede ver en la Figura 3.4. Estos materiales fueron sometidos a diferentes ensayos para determinar sus características físicas y mecánicas como contenido de humedad, densidad, granulometría (para la tierra del adobe) y resistencia a compresión.

Las muestras de concreto fueron de forma cilíndrica cuyas dimensiones se muestran en la Tabla 3.3. Los especímenes fueron tomados de forma aleatoria de un grupo de probetas que fueron diseñadas para tener una resistencia a compresión entre 17 y 30 MPa. En cada una de las probetas se realizaron ensayos de resistencia a compresión uniaxial (ASTM C39, 2015), densidad aparente (ASTM C38, 2014) y contenido de humedad (ASTM C566, 2013). Los resultados de estos ensayos se presentan en la Tabla 3.1. La resistencia a compresión de las probetas estuvo entre 17 y 28 Mpa. Además se determinó una densidad promedio de 2345 kg/m³ y un contenido de humedad promedio menor a 8%.

Tabla 3.1 Propiedades de muestras de concreto

Muestra	f'c (Mpa)	Densidad (Kg/m3)	Humedad (%)
1	24.3	2350	7.8
2	19.2	2320	8.3
3	27.8	2363	7.6
4	30.8	2347	7.4
5	17.5	2342	8.4
Promedio	23.9	2345	7.9
Std	5.6	15.5	0.4
CV%	23%	1%	6%



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2 Ensayos en probetas de concreto (a) Resistencia a compresión (b) Densidad aparente (c) contenido de humedad.

Las dimensiones de las muestras de ladrillo, adobe y cantería se muestran en la Tabla 3.3. Los ladrillos fueron bloques sólidos con una densidad de 1554 kg/m³, y un contenido de humedad de 1.4%. La granulometría de la tierra empleada se determinó mediante la norma

ASTM D422 (2014) y se muestra en la Figura 3.3. En la figura se puede ver que tiene un porcentaje de finos igual a 52 %, arenas en un 43% y finalmente presenta un 4% de gravas. Esta granulometría se encuentra dentro de la envolvente de curvas granulométricas para construcciones de tierra sugerida por Delgado y Guerrero (2007) por lo que es adecuada para la fabricación de adobes. La tierra tiene una densidad igual a 1804 kg/m^3 y un contenido de humedad de 2.5%. La cantería es un material que proviene de roca volcánica la cual fue labrada para obtener unidades de albañilería de $20 \times 13 \times 9 \text{ cm}$. En este material se determinó una densidad de 1708 kg/m^3 . Los valores de contenido de humedad fueron determinados usando las normas ASTM D2216 (2010) en todos los materiales.

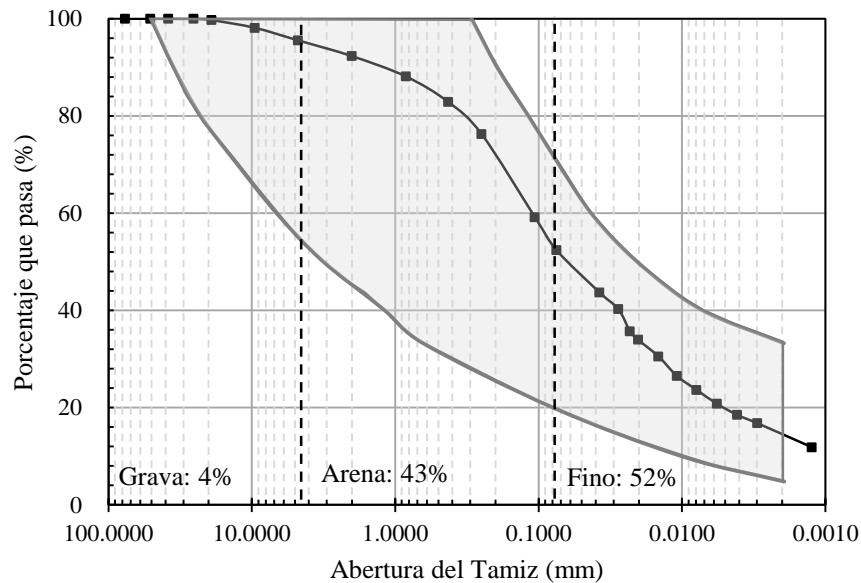


Figura 3.3 Granulometría de tierra de adobe y envolvente sugerida por Delgado y Guerrero (2007)

Las piedras estudiadas son rocas ígneas del tipo graníticas. En estas rocas se obtuvo un contenido de humedad de 0.3%, una densidad de 2695 kg/m^3 y una resistencia a compresión de 66 MPa. Este último parámetro se determinó mediante la norma ASTM D7012 (2014).

En la siguiente tabla se presenta un resumen de cada una de las propiedades de los materiales en estudio. Donde W es el contenido de humedad expresado en %.

Tabla 3.2 Resumen de Propiedades de los materiales

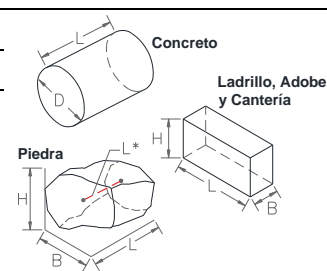
Material	Densidad (Kg/m3)	W (%)
Adobe	1804	2.5%
Ladrillo	1554	1.4%
Cantería	1708	1.3%
Concreto	2345	7.9%
Piedra	2695	0.3%

Los ensayos sínicos y ultrasónicos fueron efectuados en cada uno de los materiales siendo la longitud de ensayo el largo L [mm] de las muestras tal como se ve en la Figura 3.4 y en la Tabla 3.3. En ella también se puede ver que debido a las dimensiones variables de las piedras los ensayos fueron realizados en las caras más planas y la longitud de ensayo es L^* [mm] (Ver Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Dimensiones de muestras en mm

Muestra	Adobe			Ladrillo			Cantería		
	L	B	H	L	B	H	L	B	H
1	299	51	102	239	68	135	201	89	130
2	283	81	155	238	70	135	202	91	131
3	282	78	154	239	67	135	201	92	129
4	280	79	150	238	68	138	200	95	130
5	277	80	154	238	70	136	202		

	Concreto		Piedra			
	L	D	L	B	H	L*
1	307	151	162	132	85	112
2	305	152	184	142	129	113
3	305	153	162	126	93	87
4	306	152	220	157	126	118
5	304	151	236	214	131	107



L: largo; B: ancho; H: altura; D: diámetro; L*: longitud de ensayo en las muestras de piedra

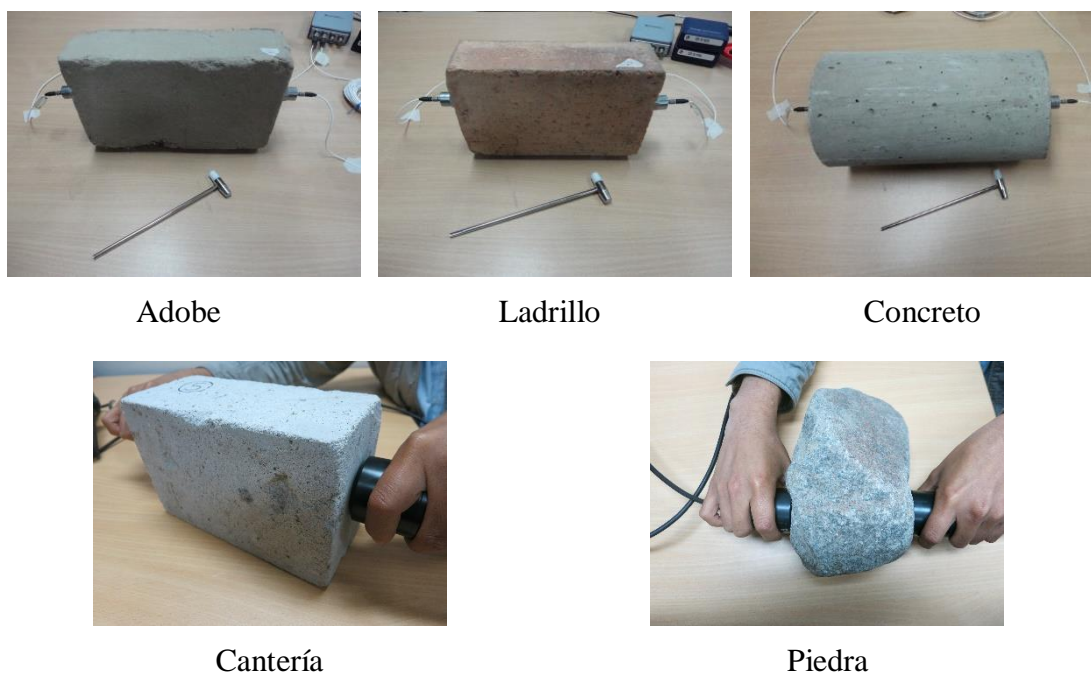


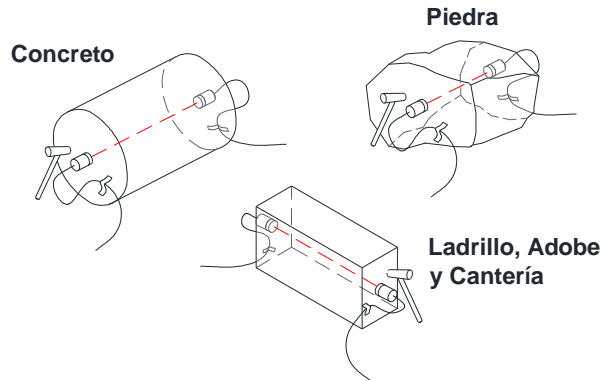
Figura 3.4 Muestras de materiales estudiados

3.2.3 Registro de datos

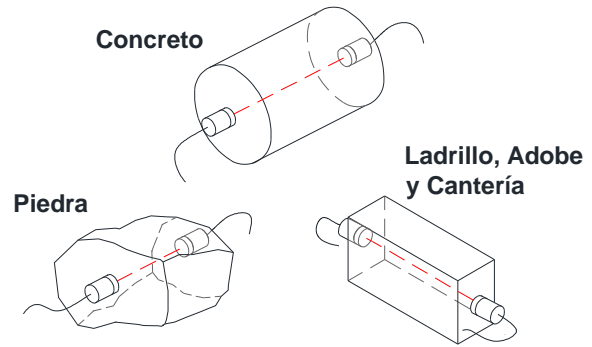
La aplicación de los ensayos sónicos se llevó a cabo utilizando la configuración directa. Las medidas fueron realizadas en el centro de cada muestra. En cada punto se tomaron 10 registros de señal con ambos receptores. En la Figura 3.5a se presenta la configuración de los ensayos sónicos así como la técnica empleada para cada tipo de muestra y material.

De la misma forma los ensayos ultrasónicos fueron realizados en los mismos puntos donde se aplicaron las pruebas sónicas. Se registraron 5 señales en cada una de las muestras. Las medidas fueron tomadas tomando en consideración las recomendaciones de la norma

(ASTM C597, 2009). Gel acoplante fue necesario en casi todas las muestras. En piedra no se utilizó el gel debido a que alteraba el registro de las ondas.



(a)



(b)

Figura 3.5 Registro de datos (a) Ensayos sónicos en una probeta de concreto y técnica empleada en todas las muestras (b) Prueba de ultrasonido en muestra de cantería.

3.3 Ensayos sónicos

3.3.1 Δt al inicio de cada señal

De cada muestra se obtuvo 10 registros y en cada uno de ellos se determinó Δt de forma visual en el inicio de cada señal. Para acelerar el proceso de cálculo, se desarrolló un programa en Matlab para obtener el tiempo al inicio de cada registro de la misma manera como se mostró anteriormente en la Figura 2.4. Para el procesamiento de las señales, cada una fue normalizada a su amplitud máxima. Durante los ensayos se observó que las amplitudes anteriores a la llegada de la onda P eran menores a 0.01. Además debido a la baja frecuencia de muestreo del DAQ fue necesario incrementar la resolución de las señales utilizando la interpolación de Fourier (Sauer, 2012). Esta técnica permite crear una cierta cantidad de datos intermedios entre dos puntos utilizando una interpolación de funciones de senos y cosenos. Esta técnica se empleó para que el programa desarrollado pueda analizar cada registro. En la Figura 3.6 se presenta como fueron calculados los Δt en cada uno de los registros.

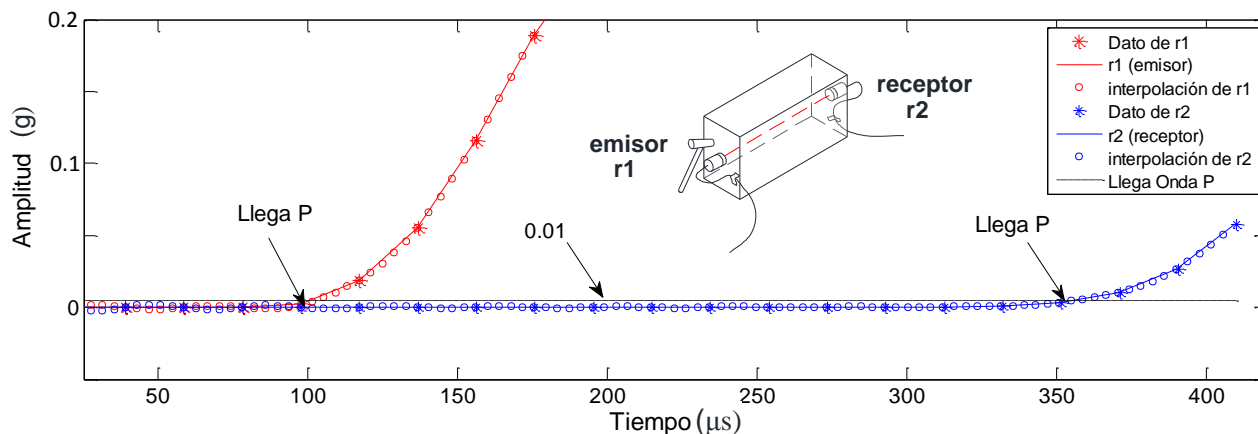


Figura 3.6 Diferencia de tiempo de las señales adquiridas en el punto emisor y receptor.

Como siguiente paso se determinó el número apropiado de puntos a crear entre cada uno de los datos de la señal original. Para ello se hizo un análisis de las señales utilizando la interpolación de Fourier considerando desde cero hasta 1000 puntos creados en intervalos de 10 en 10. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 3.7 donde se observa que entre este rango de valores la velocidad calculada en cada uno de los materiales varía hasta mantener un valor constante a partir de 100 puntos creados. Por lo tanto se determinó que el valor de 100 era el número óptimo ya que cantidades mayores no influyeron en la velocidad de la onda P. Por lo tanto se utilizó la interpolación de Fourier para aumentar en 100 veces la resolución en el cálculo de Δt . Esto es como si se hubiera utilizado un adquisidor de datos de 5 MHz, es decir se hubieran registrado las señales con una aproximación de 0.2 μs . en vez de los 19.5 μs tomados originalmente.

Haciendo uso de la ecuación (1), las longitudes de la Tabla 3.3 y los Δt obtenidos se calcularon las velocidades promedio de cada muestra. Los resultados se presentan en la Tabla 3.4. Los valores entre paréntesis indican el coeficiente de variación para cada muestra.

Con esta metodología se obtuvo un valor promedio de 1290 m/s en adobe en un rango de velocidades que van desde 1150 a 1360 m/s. En este material los CV en cada muestra fueron bajos tal como se puede ver en la Tabla 3.3. De la misma manera en ladrillo una velocidad cercana a los 1370 m/s pudo ser calculada con un valor máximo y mínimo de 1290 y 1450 m/s. Todos los CV obtenidos en cada una de sus muestras fueron menores al 5%. En concreto el valor promedio obtenido fue de 4500 m/s. Una de sus muestras presenta un CV cercano al 8%, pero sigue siendo menor a 10%. En cantería la velocidad promedio calculada fue de 2110 m/s en un intervalo de velocidades que varían desde 1980 a 2230 m/s. Los CV de casi todas las muestras fueron de 5%. Con mucha dificultad se pudo determinar el intervalo de tiempo en las muestras de piedra debido a las cortas longitudes de las muestras. A pesar de eso se determinó una velocidad promedio cercana a los 6350 m/s. En este material las velocidades variaron desde 5400 hasta 7100 m/s pero con CV menores al 8%.

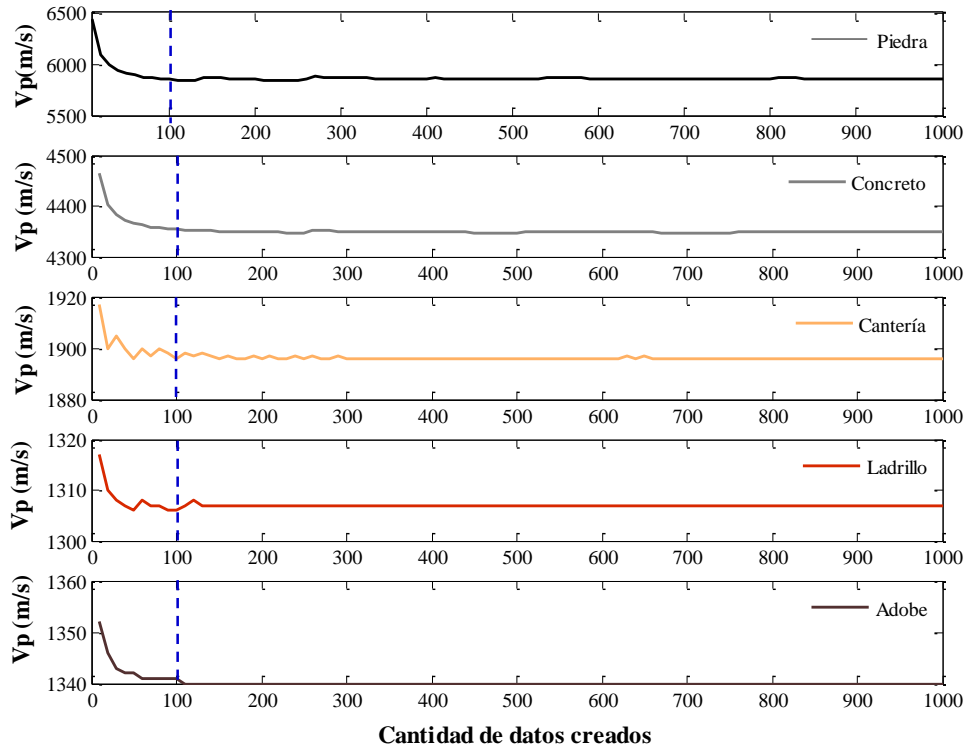


Figura 3.7 Variación de la velocidad con respecto a la cantidad de puntos creados usando la interpolación de Fourier.

Tabla 3.4 Velocidades promedio obtenidos en los materiales por Δt en m/s

Muestra	Adobe	Ladrillo	Concreto	Cantería	Piedra
1	1152 (3.0)	1357 (3.3)	4358 (2.3)	2228 (6.0)	6438 (3.5)
2	1355 (4.2)	1453 (4.3)	4378 (6.6)	1979 (4.7)	5774 (<1.0)
3	1301 (5.8)	1447 (3.8)	4655 (7.9)	2188 (2.0)	7025 (5.0)
4	1305 (2.8)	1291 (1.7)	4749 (1.5)	2114 (4.5)	5410 (4.6)
5	1338 (3.6)	1319 (2.6)	4417 (2.3)	2042 (4.9)	7110 (7.9)
Promedio	1290	1373	4511	2110	6351
Std	81	74	178	102	751
CV %	6.3%	5.4%	4.0%	4.8%	11.8%

3.3.2 Diferencia de Picos de señales filtradas

Se propuso filtrar las señales utilizando un filtro elíptico y por medio de diferencia de N picos se calculó la diferencia de tiempos entre el emisor y receptor. Como ejemplo se presenta la metodología empleada para un registro de la muestra 1 de ladrillo en la Figura 3.8.

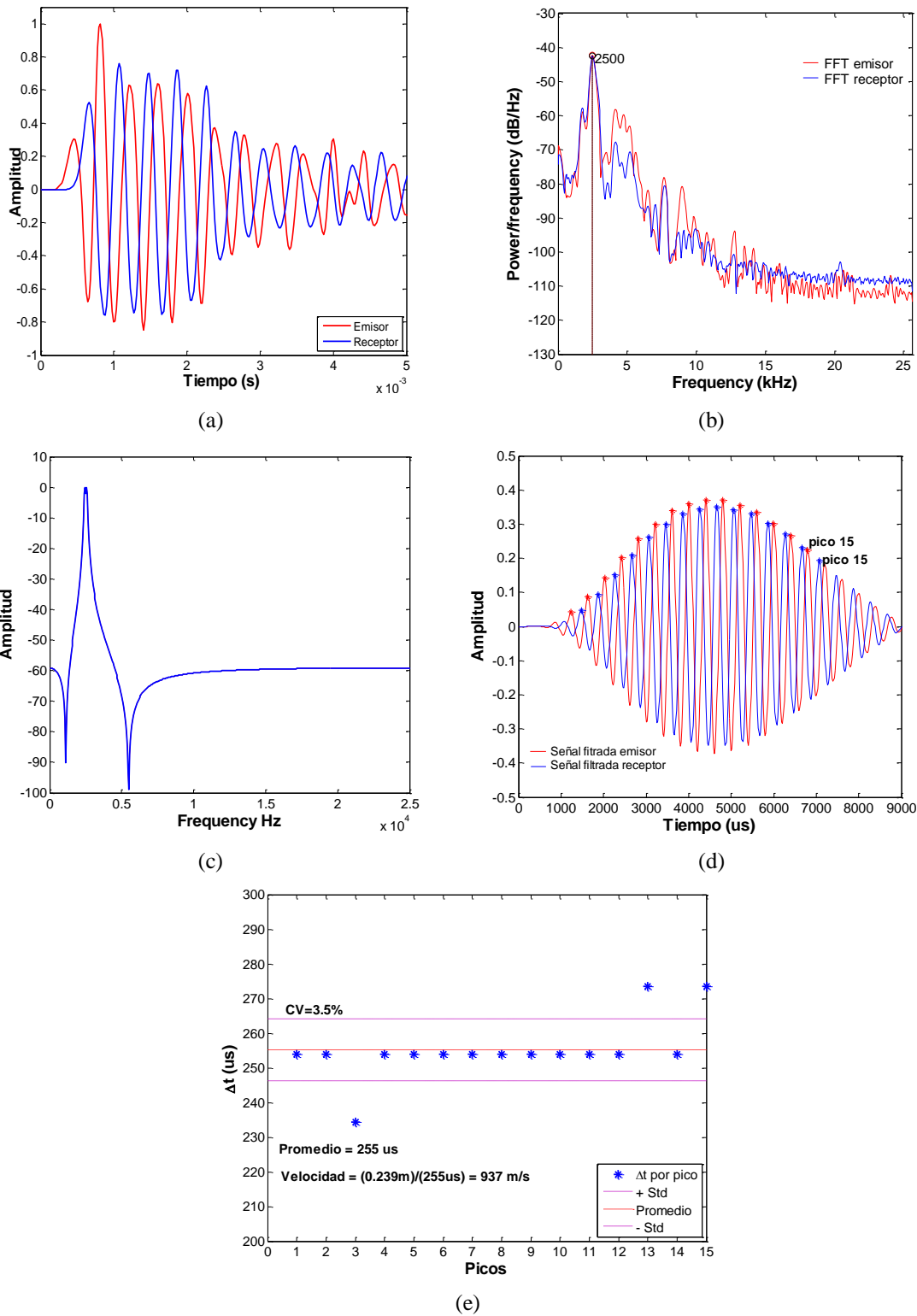


Figura 3.8 Diferencia de Picos de señales filtradas de la muestra 1 de ladrillo (a) registros (b) FFT por Welch (c) filtro elíptico (d) diferencia de picos de señales filtradas (e) resultados de Δt y V_p

Un paso fundamental fue calcular la frecuencia predominante de las señales obtenidas. Para obtener la frecuencia de reflexión de la onda P se ha utilizado el algoritmo de la FFT a cada uno de los registros usando la metodología de Peter Welch (Welch, 1967). Como parámetros se han considerado ventanas de 512 puntos con 50% de traslape y una frecuencia de muestreo de 51.2 kHz.

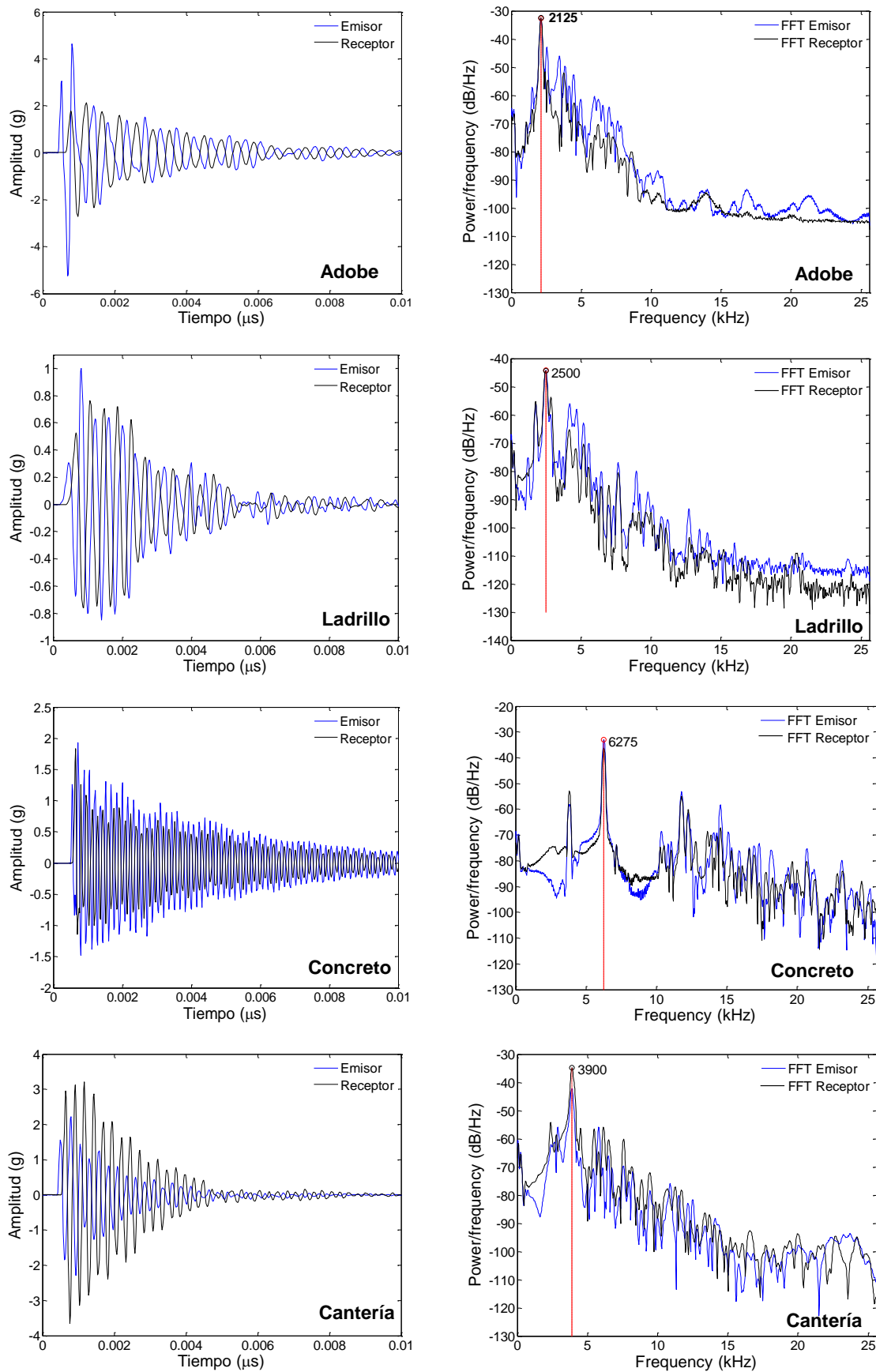


Figura 3.9 Señales y frecuencias de reflexión máximas en materiales. Adobe, ladrillo, concreto y cantería.

En la Figura 3.9 se muestran las frecuencias de reflexión máximas del emisor y del receptor en cada uno de los materiales así como las señales adquiridas. Se puede ver que existe una frecuencia predominante en todos los materiales. Esta frecuencia está asociada a la cantidad de veces que ha rebotado la onda P en el material en un segundo. Es por eso que esta metodología propone aislar únicamente a la onda P y eliminar las otras ondas (S y R) que se generan cuando se realizan los ensayos sísmicos.

En la Tabla 3.5 se presentan las frecuencias máximas obtenidas en cada muestra en cada material. En las muestras de piedra no se pudo determinar la frecuencia de reflexión de la onda P. Esto debido a que el rango de medición del acelerómetro fue de hasta 10 kHz y las reflexiones en la piedra para las longitudes ensayadas estuvieron comprendidas entre 22 y 38 kHz por lo que no pudieron ser registradas. Estas frecuencias se calcularon usando la ecuación (2), las velocidades en piedra calculadas utilizando ensayos sísmicos y las longitudes de la Tabla 3.3.

Tabla 3.5 Frecuencias máximas de las muestras (Hz)

Muestra	Adobe	Ladrillo	Concreto	Cantería	Piedra
1	1450	2500	6033	4540	-
2	2125	2525	6025	3900	-
3	2275	2650	6191	4175	-
4	2118	2400	6275	3983	-
5	2195	2450	5043	3950	-

La metodología propuesta se aplicó a los registros de datos de todas las muestras. Los resultados de las velocidades calculadas y coeficientes de variación (valores entre paréntesis en %) se presentan en las Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Velocidades en los materiales por diferencia de picos de señales filtradas (m/s)

Muestra	Adobe	Ladrillo	Concreto	Cantería	Piedra
1	860 (<1.0)	933 (2.4)	3227 (3.8)	1560 (2.5)	-
2	980 (1.7)	952 (1.0)	3257 (3.5)	1874 (6.4)	-
3	935 (1.8)	1101 (1.3)	3800 (3.1)	1244 (2.5)	-
4	1015 (4.6)	973 (1.4)	3885 (0.9)	1563 (4.7)	-
5	1017 (2.9)	919 (<1.0)	3374 (5.9)	2061 (4.9)	-
Promedio	962	975	3509	1661	-
Std	66	73	311	316	-
CV %	6.8%	7.5%	8.9%	19.0%	-

Con el uso de esta metodología se obtuvo una velocidad promedio de 960 m/s en adobe. La velocidad mínima fue de 860 m/s y la máxima cercana a 1020m/s. El CV en cada una de sus muestras fue menor al 5% tal como se ve en la Tabla 3.6. En ladrillo el rango de velocidades estuvo entre 920 y 1100 m/s con un promedio de 975 m/s. En este material los CV en cada una de sus muestras fueron menores a 2.5%. El promedio de velocidades en concreto fue de alrededor 3500 m/s, entre 3220 y 3890 m/s aproximadamente. El CV más alto fue de 6% en las muestras de este material. Finalmente una velocidad promedio de 1660 m/s fue calculada en la cantería en un rango que varía desde los 1240 a 2060 m/s. El CV en todas sus muestras

fueron menores al 6.5% (Ver Tabla 3.6), pero su CV promedio de las 5 muestras de cantería fue de 19% esto debido a la baja velocidad de la muestra 3 de 1240 m/s.

3.4 Ultrasonido

Ensayos de ultrasonido se llevaron a cabo en cada una de las muestras. Los transductores de onda P fueron colocados en los mismos puntos donde se posicionaron los acelerómetros en los ensayos sónicos.

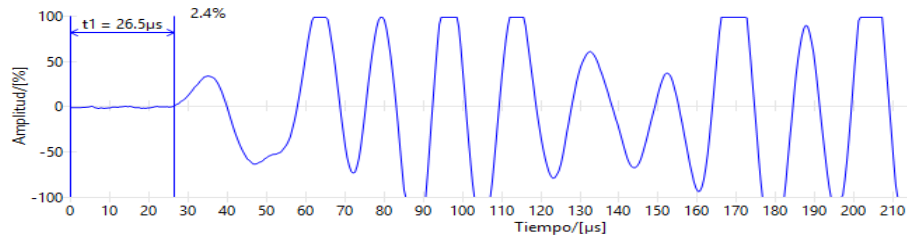
En la Figura 3.10 se presenta como ejemplo los registros obtenidos de la muestra 4 de piedra. El tiempo de viaje (Δt) fue ubicado de forma manual al inicio de cada señal usando el software PunditLink (Proceq, 2012). En la muestra 4 de piedra el promedio de 26.5 μs con un CV de 1.4%.

Una vez determinado el tiempo de viaje (Δt) de la onda P en el material y la longitud de recorrido se calcula su velocidad usando la ecuación (1). Para la muestra 4 de piedra la velocidad es $V_p = 0.118 \text{ m} / 26.5 \mu s = 4454 \text{ m/s}$. El mismo procedimiento se aplicó a todas las muestras de los diferentes materiales estudiados. Las velocidades de onda P calculadas aplicando la metodología ultrasónica se presentan en la Tabla 3.7. Los valores entre paréntesis corresponden CV calculados en cada una de las muestras.

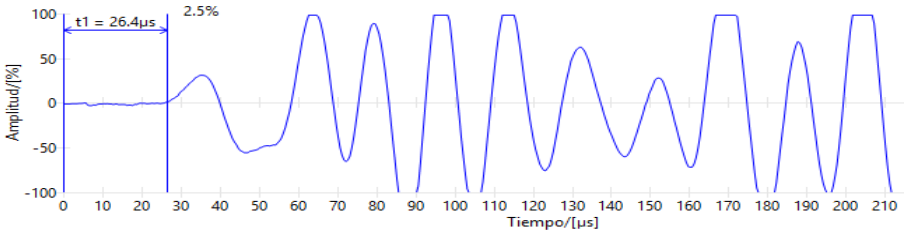
Tabla 3.7 Velocidades en los materiales con ensayos ultrasónicos (m/s)

Muestra	Adobe	Ladrillo	Concreto	Cantería	Piedra
1	1260 (1.1)	1256 (<1.0)	4176 (<1.0)	2031 (<1.0)	6061 (<1.0)
2	1330 (<1.0)	1327 (<1.0)	3961 (<1.0)	1800 (<1.0)	5350 (<1.0)
3	1433 (<1.0)	1333 (<1.0)	4307 (<1.0)	1922 (<1.0)	4902 (<1.0)
4	1361 (<1.0)	1184 (<1.0)	4409 (<1.0)	1811 (<1.0)	4454 (<1.0)
5	1333 (<1.0)	1209 (<1.0)	3878 (<1.0)	1832 (<1.0)	5130 (<1.0)
Promedio	1344	1262	4146	1879	5179
Std	62	67	225	97	594
CV %	4.6%	5.3%	5.4%	5.2%	11.5%

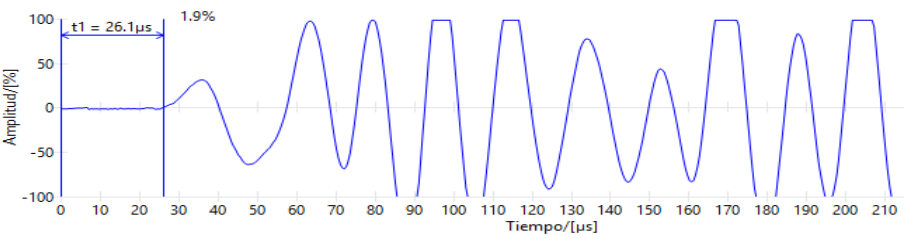
Utilizando los ensayos de ultrasonido se obtuvo una velocidad promedio aproximada de 1350 m/s en adobe. El rango de velocidades de las muestras varía entre 1260 y 1430 m/s. En ladrillo la velocidad mínima y máxima calculadas fueron de 1180 y 1330 m/s respectivamente y el promedio fue cercano a 1260 m/s. En concreto los resultados de las velocidades concuerdan con los reportado por Naik, et al. (2003) donde definen que para concretos ordinarios, la velocidad de propagación con ultrasonido está entre 3700 y 4200 m/s. En esta campaña experimental se determinó una velocidad promedio de 4150 m/s entre 3850 y 4400 m/s en este material. En cantería las velocidades calculadas estuvieron entre 1800 y 2050 m/s con un promedio cercano a 1880 m/s. Finalmente las velocidades obtenidas en piedra estuvieron entre 4450 y 6050 m/s con un promedio aproximado de 5200 m/s. Estos valores concuerdan con las velocidades calculadas en piedra granítica realizado por Vasconcelos (2005) las cuales se encuentran entre 4000 y 4800 m/s. Los coeficientes de variación en casi todas las muestras fueron menores a 1% lo que muestra la poca variabilidad del ensayo de ultrasonido y la gran confiabilidad del método.



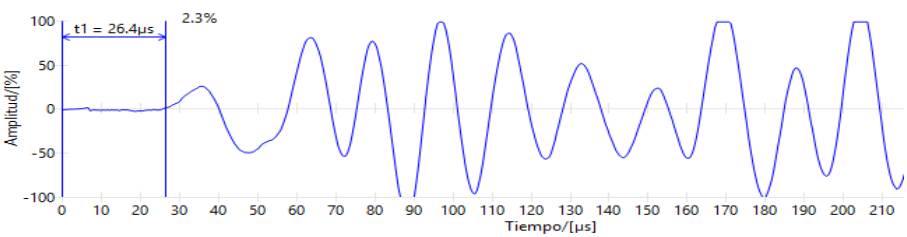
$\Delta t = 26.5 \mu s$



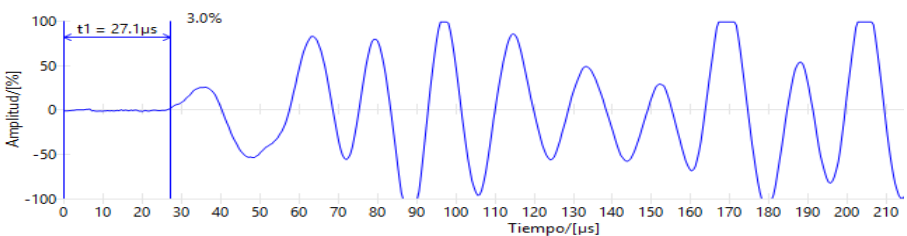
$\Delta t = 26.4 \mu s$



$\Delta t = 26.1 \mu s$



$\Delta t = 26.4 \mu s$



$\Delta t = 27.1 \mu s$

(a)



$\overline{\Delta t} = 26.5 \mu s$
 $CV = 1.4 \%$
 $V_p = 4454 \text{ m/s}$

(b)

Figura 3.10 Resultados de ultrasonido de la muestra 4 de piedra (a) registros ultrasónicos (b) configuración de ensayo y resultados.

3.5 Impacto eco

Para determinar la frecuencia de reflexión máxima de la onda P se ha usado el algoritmo de FFT en cada uno de los registros usando la metodología de Peter Welch (Welch, 1967). Como parámetros se han considerado ventanas de 512 puntos con 50% de traslape y una frecuencia de muestreo de 51.2 kHz.

Se pudo determinar la frecuencia máxima del emisor y receptor en cada uno de los registros. En la Figura 3.11 se presentan los resultados de una muestra de concreto así como las señales en el dominio del tiempo. Se puede ver que las frecuencias máximas en ambos casos es la misma, lo cual es lógico debido a las reflexiones que se producen en ambas caras por el rebote de la onda P. Pero si se observa con mayor detalle se pueden ver que el espectro del punto emisor contiene otras frecuencias, esto posiblemente a causa del golpe dado en esa cara de la muestra.

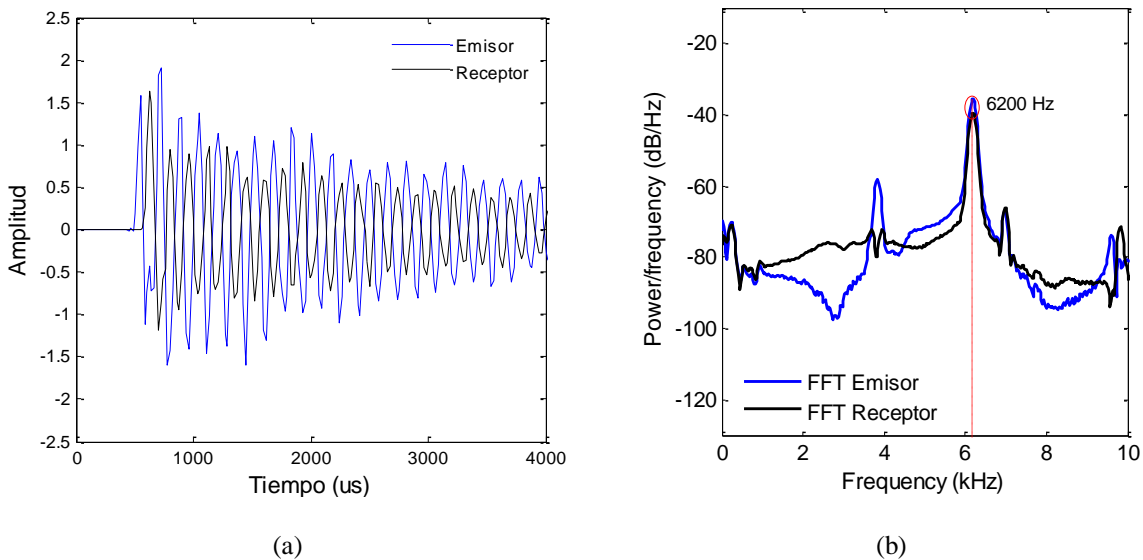


Figura 3.11 Frecuencia máxima de una muestra de concreto (a) Señales adquiridas (b) FFT por P Welch.

En la Tabla 3.5 presentada anteriormente se pueden ver las frecuencias máximas obtenidas en cada muestra de cada material. De igual manera que en la sección 3.3.2 no se pudo identificar la frecuencia de reflexión de la onda P de las muestras de piedra. En las muestras de este material no se pudo determinar la frecuencia máxima debido a que el rango de medición del acelerómetro fue de hasta 15 kHz y las reflexiones en la piedra para el tamaño de las muestras ensayadas fueron entre 22 y 38 kHz por lo que estas frecuencias no pudieron ser registradas por los acelerómetros.

Una vez determinadas las frecuencias máximas se hizo uso de la ecuación (2) y las longitudes de ensayo de la Tabla 3.3 para calcular las velocidades de onda P. Por ejemplo para la muestra 1 de adobe la velocidad obtenida es $V_p = 2 \cdot T \cdot f / 0.96 = 2 \cdot (0.299\text{m}) \cdot (1450\text{ Hz}) / 0.96 = 903\text{ m/s}$. En la Tabla 3.8 se presenta las velocidades calculadas en cada muestra. Los valores entre paréntesis corresponden a los CV obtenidos con la técnica de Impacto eco en cada una de las muestras. En todos los casos, este valor fue menor a 1% lo que indica la repetitividad del método y su confiabilidad.

Tabla 3.8 Velocidades en los materiales por Impacto eco (m/s)

Muestra	Adobe	Ladrillo	Concreto	Cantería	Piedra
1	903 (<1.0)	1245 (<1.0)	3858 (<1.0)	1901 (<1.0)	-
2	1253 (<1.0)	1252 (<1.0)	3828 (<1.0)	1641 (<1.0)	-
3	1337 (<1.0)	1319 (<1.0)	3934 (<1.0)	1748 (<1.0)	-
4	1235 (<1.0)	1190 (<1.0)	4000 (<1.0)	1659 (<1.0)	-
5	1280 (<1.0)	1215 (<1.0)	3194 (<1.0)	1662 (<1.0)	-
Promedio	1202	1244	3763	1722	-
Std	171	49	325	108	-
CV %	14.2%	3.9%	8.6%	6.3%	-

La técnica de Impacto eco permitió calcular como valor promedio una velocidad aproximada de 1200 m/s en adobe en un rango que varía desde los 900 a 1350m/s. A pesar de que el CV en todas sus muestras fue menor a 1%, el CV calculado del promedio de las 5 muestras de adobe fue de 14% esto debido a la velocidad baja que presentó la muestra 1. En ladrillo el valor promedio fue alrededor de 1245 m/s con un mínimo de 1190 y un máximo de 1320 m/s y un CV aproximado de 4%. En concreto la velocidad promedio aproximada fue de 3750 m/s con un CV cercano a 9% en un rango de velocidades desde los 3200 a 4000 m/s. Finalmente en la cantería las velocidades estuvieron entre los 1650 m/s y 1950 m/s con un promedio cercano a 1700 m/s y CV de 6%. Con esta técnica no se pudo determinar la velocidad en piedra debido a que no se pudo determinar la frecuencia de reflexión en las muestras.

3.6 Resumen de resultados

En la Tabla 3.9 se presenta un resumen de las velocidades calculadas usando las diferentes metodologías estudiadas. Como velocidad de referencia se han tomado las calculadas por ultrasonido debido a los bajos coeficientes de variación en cada muestra ensayada (menores a 1%) y por la confiabilidad del método.

Las velocidades calculados por el método de diferencia de tiempo (Δt) son mayores hasta en un 10 % en ladrillo, concreto y cantería. En piedra los valores se incrementan hasta en un 20% y en adobe son menores en un 5%.

Al comparar las velocidades calculadas por Impacto eco, Δt y la diferencia de picos de señales filtradas se determinó que con este último se obtuvieron velocidades menores, esto debido posiblemente al filtrado de las señales.

En este capítulo se decidió tomar como metodologías de cálculo de velocidad a la diferencia de tiempo (Δt) y al ultrasonido en los capítulos siguientes. Esto debido a que la metodología de Impacto eco permite calcular espesores de materiales. Se utilizó en esta parte de la investigación porque de antemano se conocía el espesor del objeto en estudio y además se sabía que estaba compuesto únicamente por un material. Si el elemento a ensayar está compuesto por otros materiales, se obtendría la frecuencia de reflexión máxima entre la interface de estos materiales y la superficie de ensayo. Luego se puede ver que las velocidades calculadas usando la metodología propuesta son menores a las calculadas por el método de ultrasonido, el cual es el más confiable. La velocidades son aproximadamente

menores en un 28%, 23%, 15% y 12% en adobe, ladrillo, concreto y albañilería respectivamente. Ya que en este método se utiliza la frecuencia de reflexión máxima para el filtrado de las señales, también se descarta por las mismas razones que en la metodología de Impacto eco.

Tabla 3.9 Resumen de Velocidad de onda P en materiales al aplicar ensayos sónicos y ultrasónicos

Material		Metodo - Vp (m/s)			
		Δt	Impact-echo	Dif. Picos	Ultrasonido
Adobe	Promedio	1290	1202	962	1344
	Max	1355	1337	1017	1433
	Min	1152	903	860	1260
	CV	6.3%	14.2%	6.8%	4.6%
Ladrillo	Promedio	1373	1244	975	1262
	Max	1453	1319	1101	1333
	Min	1291	1190	919	1184
	CV	5.4%	3.9%	7.5%	5.3%
Concreto	Promedio	4511	3763	3509	4146
	Max	4749	4000	3885	4409
	Min	4358	3194	3227	3878
	CV	4.0%	8.6%	8.9%	5.4%
Cantería	Promedio	2110	1722	1661	1879
	Max	2228	1901	2061	2031
	Min	1979	1641	1244	1800
	CV	4.8%	6.3%	19.0%	5.2%
Piedra	Promedio	6351	-	-	5179
	Max	7110	-	-	6061
	Min	5410	-	-	4454
	CV	11.8%	-	-	11.5%

Capítulo 4

Aplicación de ensayos sónicos y ultrasónicos directos en dos muros fabricados en laboratorio

Resumen

En este capítulo se ejecutaron ensayos sónicos y ultrasónicos en dos muros de prueba para su calibración y evaluar su confiabilidad. El objetivo fue construir tomografías de una de las caras de dichos muros aplicando estos ensayos. Las pruebas se llevaron a cabo primero en un muro de concreto en cuyo interior se colocaron diferentes materiales y luego en un muro de mayor tamaño compuesto por concreto, ladrillo, piedra, cantería y adobe. Las tomografías revelaron la ubicación de los defectos colocados en el interior de los muros. Se obtuvieron mejores resultados en el primer muro de prueba debido a la densidad de la malla empleada.

4.2 Introducción

En el capítulo anterior se calcularon las velocidades en diferentes materiales usando ensayos sínicos y de ultrasonido. Estos valores fueron el resultado de la evaluación en punto del elemento en estudio. Para crear una tomografía es necesario realizar mediciones en diversos puntos ordenados como mallas rectangulares o cuadradas. En esta etapa se diseñaron y construyeron dos muros de prueba con el fin de obtener imágenes tomográficas haciendo uso de ensayos sínicos y ultrasónicos.

4.3 Características de los muros

Para validar la aplicación de las metodologías sínicas se construyeron dos muros de prueba. El primer muro (Muro 1) fue hecho de concreto y en su interior se distribuyeron diferentes materiales. En cambio el segundo muro (Muro 2) fue dividido en 5 zonas con un material predominante y en su interior se colocaron irregularidades para ser detectadas. A continuación se describe cada uno de ellos desde su fabricación, los materiales que lo componen y las irregularidades internas a detectar.

4.3.1 Descripción del Muro 1

En una primera campaña experimental se diseñó y construyó un pequeño muro de concreto de 0.60 x 0.60 x 0.25m de dimensiones. Dentro de él se colocaron dos planchas de tecnopor y madera, 1 botella y dos unidades de ladrillo como se ve en la Figura 4.1. La mezcla de diseño utilizada fue para un concreto de $f'c$ de 210 Kg/cm² con proporciones en peso de 1 : 3.2 : 2.8 (Cemento : arena : Grava) y una relación agua-cemento de 0.5.

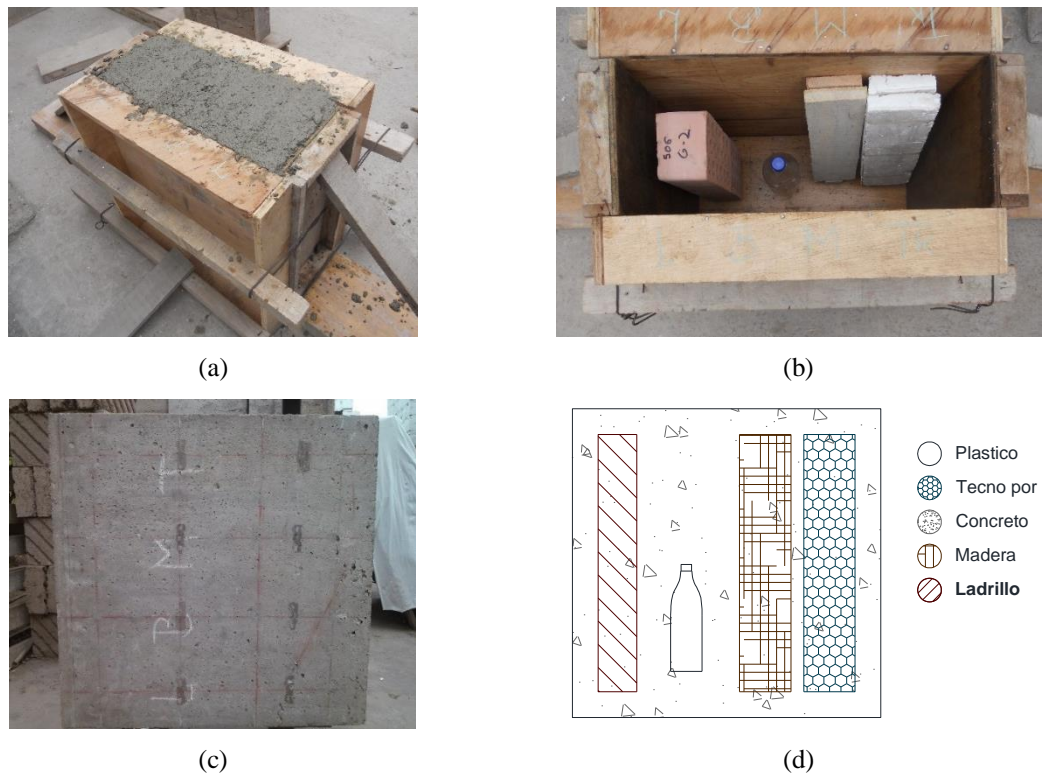


Figura 4.1 Primer muro de calibración (a) fabricación (b) irregularidades internas (c) producto final (d) esquema de distribución de materiales en su interior.

En la Figura 4.1d se observa que en el interior del muro de concreto se han distribuido cuatro diferentes materiales: ladrillo, plástico, madera y tecnopor.

4.3.2 Descripción del Muro 2

Luego en una segunda campaña y debido a las dimensiones pequeñas del primer muro, se diseñó un muro de prueba de mayor tamaño. El segundo muro de calibración estuvo compuesto por diferentes materiales y tuvo 2.00x1.20x0.60 m de dimensiones. En la Figura 4.2 se presenta el esquema interior del muro y los defectos que se colocaron para su detección.

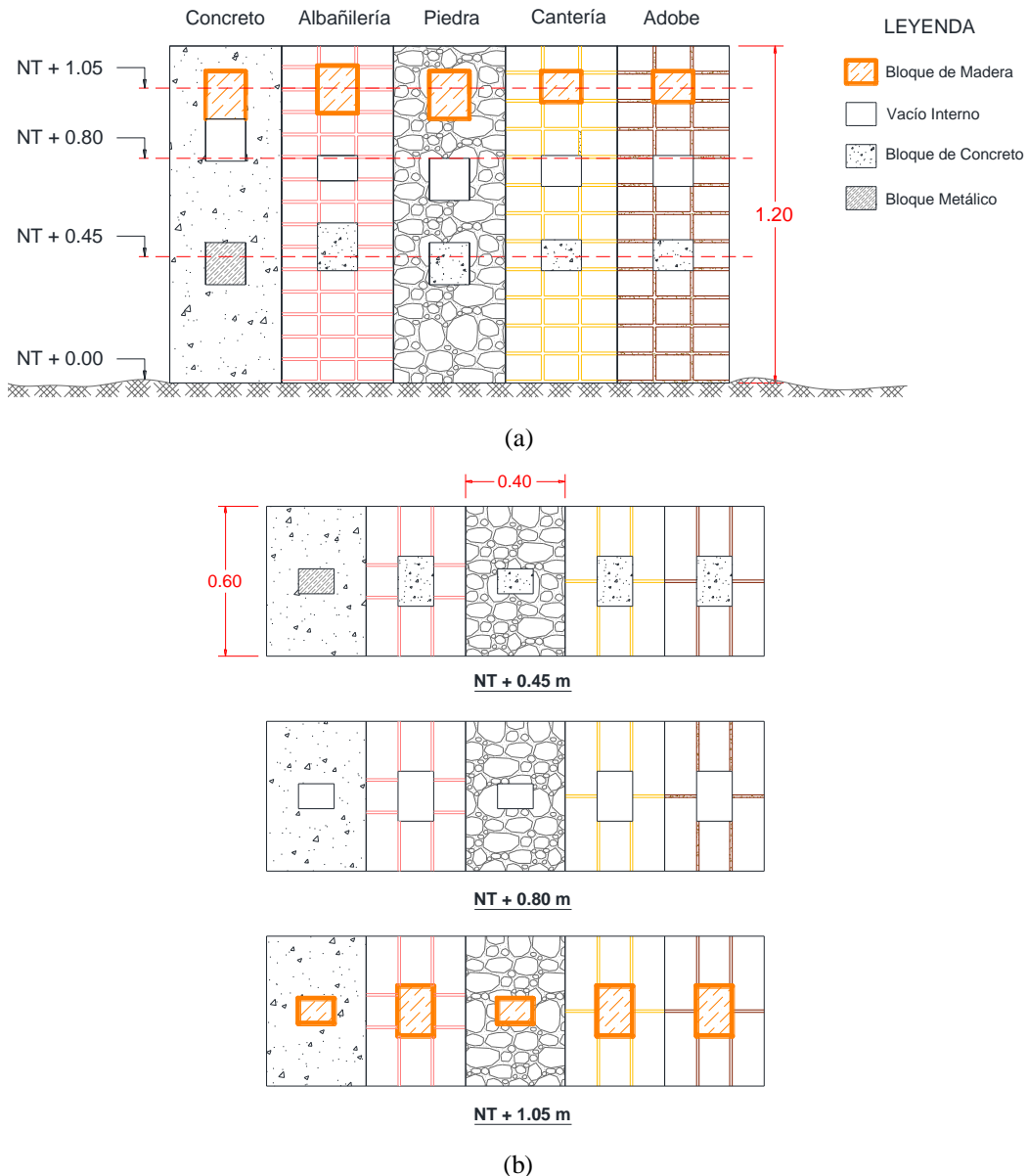


Figura 4.2 Segundo muro de calibración. (a) sección longitudinal (b) secciones transversales a 0.45, 0.80 y 1.05 m del nivel del terreno.

En la construcción de este segundo muro se empleó un concreto de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ para la zona de concreto. Las propiedades de los agregados utilizados se describen a continuación:

Agregado Fino

Peso Unitario suelto seco	1680 kg/m ³
Peso específico	2670 kg/m ³
Contenido de Humedad	2.5%
Absorción	0.9%
Módulo de finura	3.11

Agregado Grueso

Peso Unitario suelto seco	1620 kg/m ³
Peso específico	2650 kg/m ³
Contenido de Humedad	0.3%
Absorción	1.2%

Con estos valores se diseñó una mezcla de concreto con las siguientes proporciones en peso: 1 : 2.2 : 3.1 y una relación agua-cemento de 0.5.

El mortero utilizado como pegamento de la albañilería de ladrillo fue a base de cemento y arena con una proporción de 1 : 3 en volumen. Las unidades de ladrillo tuvieron como dimensiones aproximadas 0.24x0.13x0.07. Algunas unidades fueron cortadas a la mitad para cumplir con el esquema de la Figura 4.2b.

Las dimensiones de las piedras utilizadas fueron de 4 a 8 pulgadas. Además el mortero utilizado para su construcción tuvo una proporción en volumen igual 1 : 5. Las piedras fueron traídas desde Carabaylo, al norte de la ciudad de Lima.

En la elaboración de la zona correspondiente a piedra de cantería o sillar se tuvieron que cortar prismas de este material de dos tamaños diferentes. Un primer tipo tuvo como dimensiones 0.30x0.13x0.09m, en cambio el segundo tipo fue de 0.20m de longitud y la misma sección transversal. El mortero utilizado como pegamento fue a base de cal y agua. Para su fabricación se dejó en reposo la cal y el agua por más de 20 días. Durante ese tiempo se fue cambiando periódicamente el agua con el fin de que la cal se hidratara completamente. Después de este tiempo se evacuó el agua y la pasta resultante se utilizó como mortero.

Finalmente se elaboraron adobes de dimensiones iguales a los prismas de cantería. Las propiedades de la tierra utilizada, así como de los ladrillos, la cantería y piedras son las mismas que se presentaron en el capítulo 3. El proceso constructivo y producto final se detalla en la Figura 4.3.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.3 Segundo muro de calibración (a) bloque de concreto entre albañilería (b) vacío interno en la piedra (c) bloque de madera entre la cantería (d) estado final del muro.

4.4 Equipo empleado

Los ensayos sónicos fueron llevados a cabo empleado un martillo de acero no instrumentado. Los receptores fueron dos acelerómetros piezoeléctricos con una respuesta de hasta 15 kHz. Los acelerómetros estuvieron acoplados a los muros utilizando un material plástico adhesivo para una mejor transmisión de la señal. El equipo adquisidor de datos (DAQ) fue un PXIe-4499 con una resolución de 24 bits y una máxima frecuencia de muestreo de 200 kHz por canal, es decir una aproximación en el tiempo de $5 \mu\text{s}$ (Ver Figura 4.4a). Se ha utilizado el software Sonic Acq V1.0 para obtener los registros de cada prueba.

Para los ensayos ultrasónicos se utilizó el equipo de medición PunditLab+. La frecuencia de muestreo a la cual se registraron las señales fue de 2 MHz con lo se tiene una aproximación en el tiempo de $0.5 \mu\text{s}$. Se utilizaron transductores de 54 kHz para evaluar la velocidad de onda P. Siguiendo las recomendaciones de la norma (ASTM C597, 2009) se utilizó gel acoplante para mejorar el registro. (Ver Figura 4.4b)



(a)



(b)

Figura 4.4 Equipos de medición (a) ensayos sónicos (b) ensayo de ultrasonido

4.5 Registro de datos

La aplicación de los ensayos sónicos se llevó a cabo utilizando la configuración directa. La medición de los datos fueron realizadas en mallas rectangulares de 3.5 cm de espaciamiento en el muro 1 y de 10 cm en el muro 2. En la primera malla hubo en total 15 filas y 15 columnas haciendo un total de 225 puntos de ensayo. En el muro 2 cada malla estuvo compuesta por 11 filas y 4 columnas lo que genera una malla de 44 puntos por zona. En todo el muro 2 se tuvo en total $44 \times 5 = 220$ puntos. En cada punto se tomaron 10 registros con ambos receptores. En la Figura 4.5 se presenta las mallas dibujadas en los muros 1 y 2 así como la configuración de los ensayos.

De la misma forma los ensayos ultrasónicos fueron realizados en los mismos puntos donde se aplicaron las pruebas sónicas. Se registraron 5 señales en cada uno de los puntos. Las medidas fueron hechas tomando en consideración las recomendaciones de la norma (ASTM C597, 2009). Gel acoplante fue necesario para la transmisión y recepción de las señales.

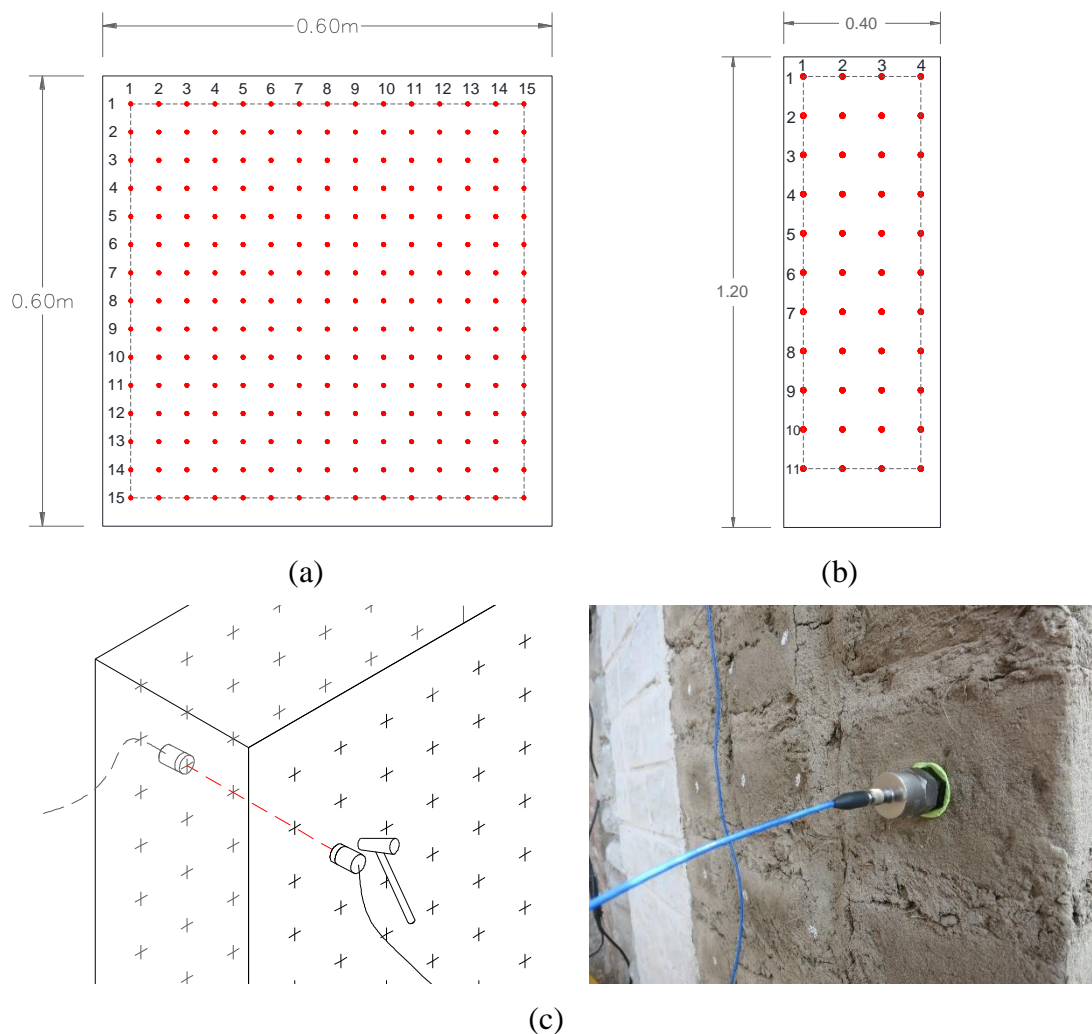


Figura 4.5 Red de puntos para el registro de datos en muros 1 y 2, (a) malla del muro 1, espaciamiento de 3.5 cm, (b) malla muro 2, espaciamiento de 10 cm (c) configuración de ensayos.

En la Tabla 4.1 y Tabla A. 1 (Ver Anexos del capítulo 4) se presentan las longitudes de ensayo en milímetros de cada uno de los puntos de cada muro. Estas medidas corresponden a los espesores de los muros y fueron tomadas con el mayor esmero y precisión posible.

En la Tabla 4.1 se observa que las longitudes de la columna 1 a la columna 15 fueron las mismas en cada una de las filas de la malla. También se puede ver que las longitudes disminuyen paulatinamente de la fila 1 a la fila 15.

Tabla 4.1 Longitudes de ensayos en Muro 1 en mm

Longitudes se repiten en todas las columnas, de la 1 a la 15	Fila					Fila	
	1	2	3	4	5		
	254	254	253	253	252		1
	Fila						5
	6	7	8	9	10		
252	252	252	252	252	5		
Fila					10		
11	12	13	14	15	10		
252	252	252	252	252	15		
Fila					15		
252	252	252	252	252	Columnas		

En la Tabla A. 1 se observa que la construcción del muro 2 abarcó más de los 0.60 m de espesor y que las longitudes de ensayo estuvieron entre 0.61 y 0.65 m aproximadamente.

También se realizaron ensayos ultrasónicos directos en los defectos internos que se colocaron en el muro 2. Estos ensayos se llevaron a cabo en los prismas de madera y concreto así como en el mortero empleado en el muro de albañilería y de piedra con el fin de conocer la velocidad de propagación. En la Figura 4.6 se presenta el registro de los datos.

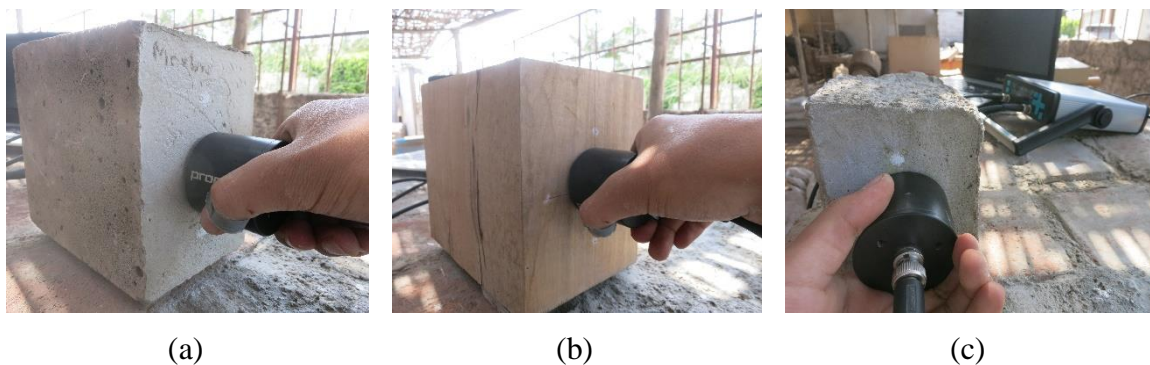


Figura 4.6 Ultrasonido en defectos internos del muro 2 (a) mortero (b) y (c) prismas de madera y concreto.

4.6 Interpretación de resultados

4.6.1 Resultados de la evaluación del muro 1

Los ensayos sónicos directos fueron llevados a cabo en cada uno de los 225 puntos (Ver Figura 4.5a). Las señales obtenidas se procesaron siguiendo la metodología de diferencia de tiempo para calcular el tiempo de viaje (Δt) de las ondas P. En cada punto se determinó el

valor de Δt el cual se reemplazó en la ecuación (1) en conjunto con las longitudes de la Tabla 4.1 para calcular las velocidades en el muro 1. Los resultados se presentan en la Tabla A. 2 en los anexos del capítulo 4.

En esta tabla se observa como varían las velocidades en cada uno de los puntos, pero para entender mejor se presenta la Figura 4.7 donde se muestran los resultados de la fila 10 y de la columna 10. En cada barra también se muestran los coeficientes de variación (CV %) que se obtuvo al procesar los datos. Todos los CV calculados en el muro 1 fueron menores al 10% en los ensayos sísmicos.

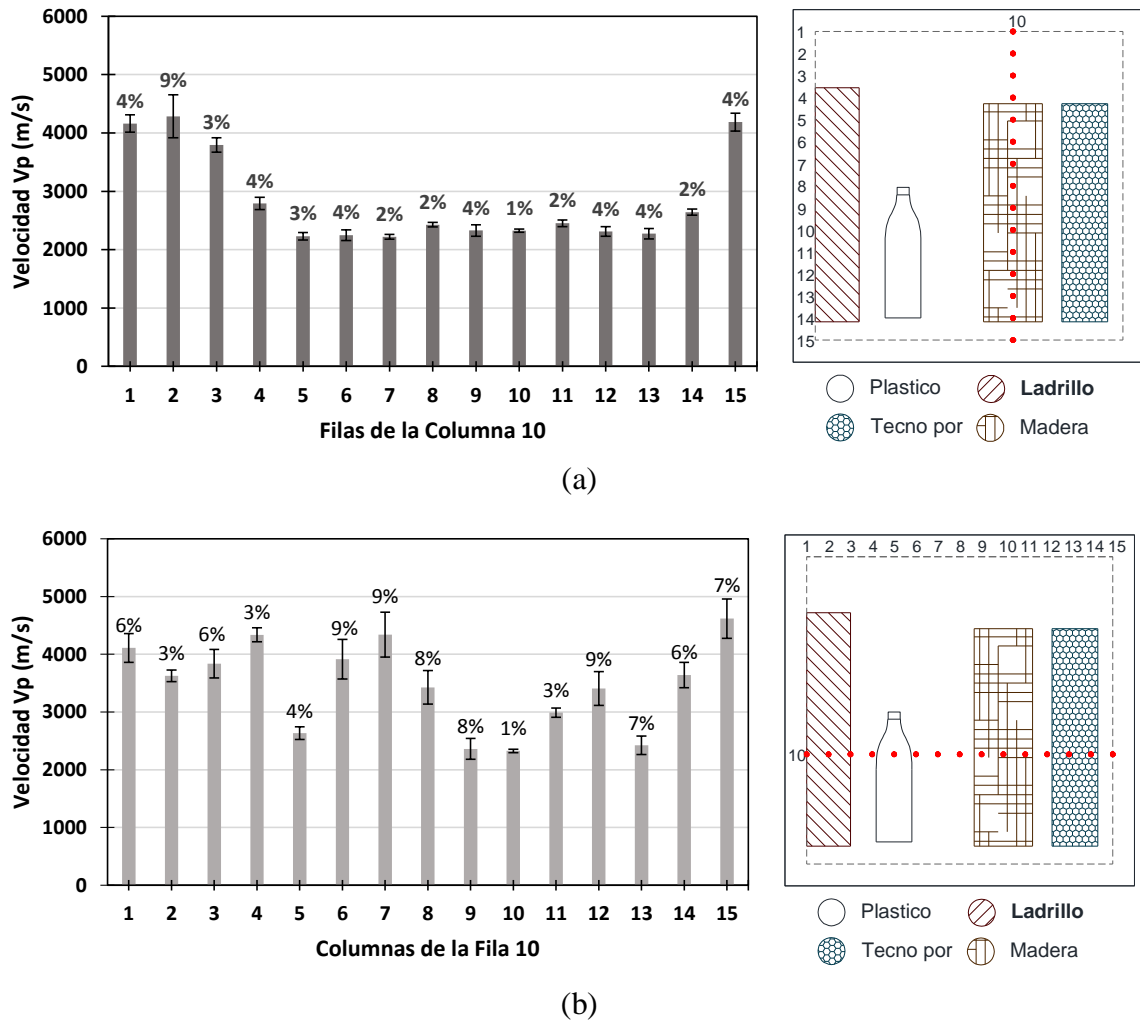


Figura 4.7 Velocidades de onda P en el muro 1 aplicando ensayos sísmicos (a) a lo largo de la fila 10 (b) en la columna 10.

En la Figura 4.7a se observa inicialmente una velocidad aproximada de 4000 m/s del punto 1 al punto 3. Luego velocidades cercanas a los 2500 m/s se calcularon entre los puntos 4 y 14. Finalmente una velocidad mayor a los 4000 m/s se obtuvo en el punto 15. La reducción de la velocidad es debido al paso de las ondas P por la madera entre los puntos 4 y 14. De igual forma el incremento de la velocidad en el punto 15 se debe a que es una zona completamente de concreto (ver Figura 4.7a).

De igual forma en la Figura 4.7b la velocidad empieza a más de 4000 m/s. Conforme fueron realizados los ensayos sónicos se observa que la velocidad disminuye e incrementa en las áreas donde se colocó el ladrillo, la botella de plástico, concreto, la madera y el tecnopor. Las velocidades más bajas se observan en los puntos 5(2630 m/s), 10(2320 m/s) y 13(2420 m/s) que corresponden a puntos en la botella, madera y tecnopor respectivamente. En el punto 2 donde se encuentra el ladrillo se calculó una velocidad cercana a 3800 m/s.

Con los valores de velocidades de la Tabla A. 2 se creó la siguiente imagen tomográfica de la cara lateral del muro de prueba 1(Ver Figura 4.8). Esta imagen se construyó haciendo una interpolación cúbica entre cada uno de los puntos. La metodología es la misma que se sigue cuando se hacen curvas de nivel pero no a una escala lineal, sino a una escala cúbica.

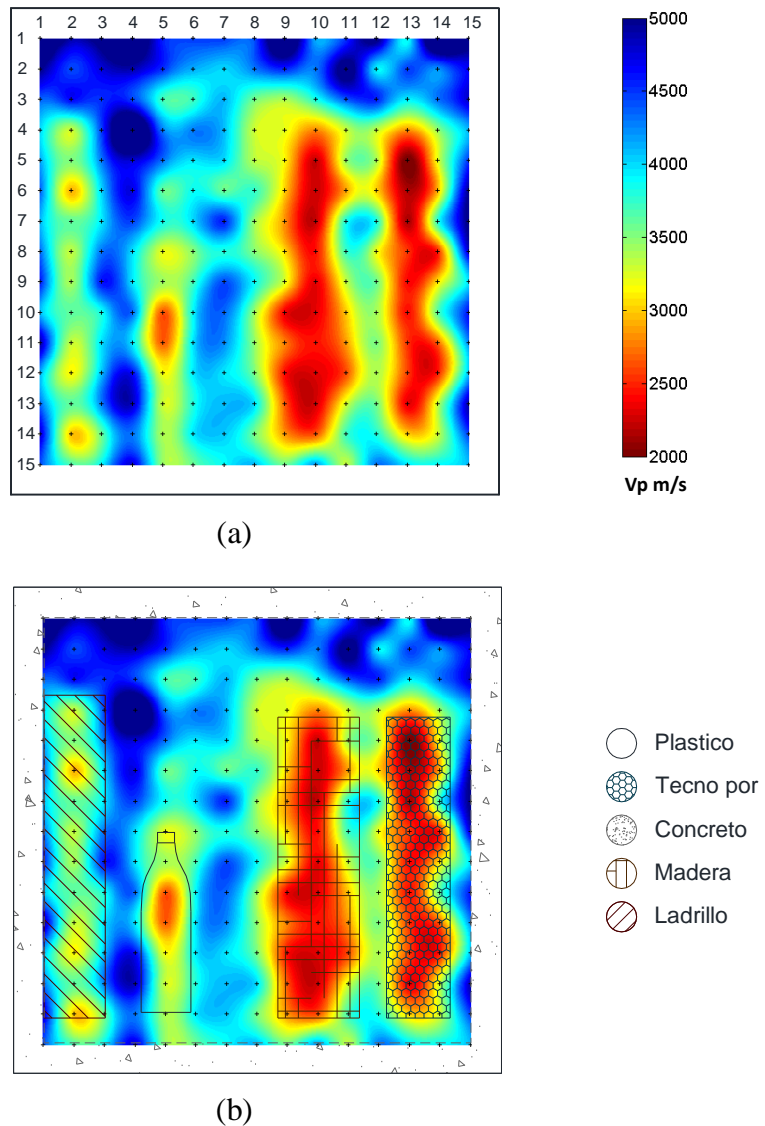


Figura 4.8 Tomografía de la cara lateral del muro 1.(a) velocidades en los puntos de ensayo
(b) superposición de imagen con los materiales internos

La Figura 4.8a muestra un cambio notable de velocidades (de 2000 a 2500 m/s) en la zona derecha del muro que se visualiza de color rojo. Estas áreas corresponden a la ubicación del tecnopor y de la madera en el interior del muro (ver Figura 4.8b). Las áreas de color azul y

celestes son zonas de mayor concentración de concreto y presentan velocidades más altas entre 4000 y 5000 m/s. A la izquierda se puede ver un color amarillo claro que muestra la ubicación del ladrillo con velocidades que varían entre los 3000 y 3500 m/s. También se pudo detectar ligeramente velocidades cercanas a 2500 m/s en la zona donde se encuentra la botella plástica.

La Figura 4.8a por si sola da a entender la existencia de irregularidades internas en el muro de concreto que hacen variar drásticamente las velocidades de onda P. Se puede ver la ubicación de los defectos, mas no se puede determinar de qué tipo son. Estas variaciones se pueden ser ocasionadas por un cambio de material, por la existencia de un vacío o por cangrejas generadas en el proceso constructivo. Debido a que se conoce el interior del muro de prueba, la Figura 4.8b muestra la fiabilidad del método para determinar la existencia de irregularidades internas mediante la creación de este tipo de imágenes.

Ensayos de ultrasonido también se realizaron en el muro 1 siguiendo la metodología de diferencia de tiempo para determinar el tiempo de viaje (Δt). Este ensayo se llevó a cabo de en cada uno de los 225 puntos donde se ejecutaron los ensayos sónicos tal como se observa en la Figura 4.9. El objetivo fue comparar las dos metodologías y determinar cual tenía una mayor aproximación al caso real.

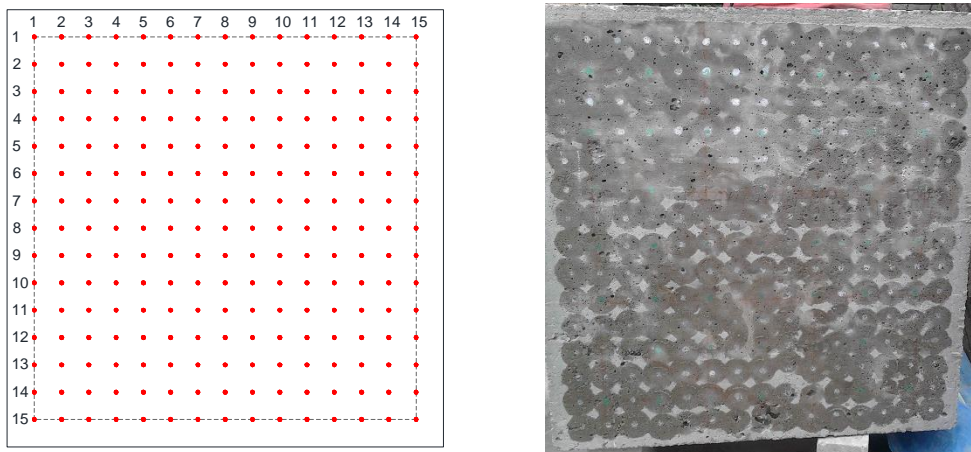


Figura 4.9 Malla cuadrada de 3.5 cm de espaciamiento usada en los ensayos de ultrasonido.

De la misma forma que en los ensayos sónicos se utilizó la ecuación (1) para calcular las velocidades en los puntos de ensayo. Las velocidades calculadas en cada uno de los puntos aplicando ensayos de ultrasonido se muestran en la Tabla A. 3 (Ver Anexos del capítulo 4).

En la Figura 4.10 se muestran los resultados de la fila 10 y de la columna 10. En cada barra también se muestran los coeficientes de variación (CV %) que se obtuvo al procesar los datos aplicando la técnica de ultrasonido. Todos los CV calculados en el muro 1 fueron menores al 3% en la técnica de ultrasonido.

En la Figura 4.10a se observan inicialmente una velocidad aproximada de 4700m/s en el punto 1 y 2. Luego la velocidad disminuye hasta 4400 m/s en el punto 3. Velocidades cercanas a los 4000 m/s se calcularon entre los puntos 4 y 13. Finalmente se incrementa la velocidad hasta 4400 m/s en el punto 15. La reducción de la velocidad es debido al paso de

las ondas P por la madera entre los puntos 4 y 14. De igual forma las velocidades más altas al inicio y al final se explican a que son zonas completamente de concreto (ver Figura 4.10a).

De igual forma en la Figura 4.10b la velocidad empieza a más de 4700 m/s. Conforme fueron realizados los ensayos de ultrasonido se observa que la velocidad disminuye e incrementa en las áreas donde se colocó el ladrillo, la botella de plástico, concreto, la madera y el tecnopor. Las velocidades más bajas se observan en los puntos 10(3900 m/s), 13 y 14 (4100 m/s) que corresponden a puntos en la madera y tecnopor respectivamente. En el punto 2 donde se encuentra el ladrillo se calculó una velocidad cercana a 4300 m/s.

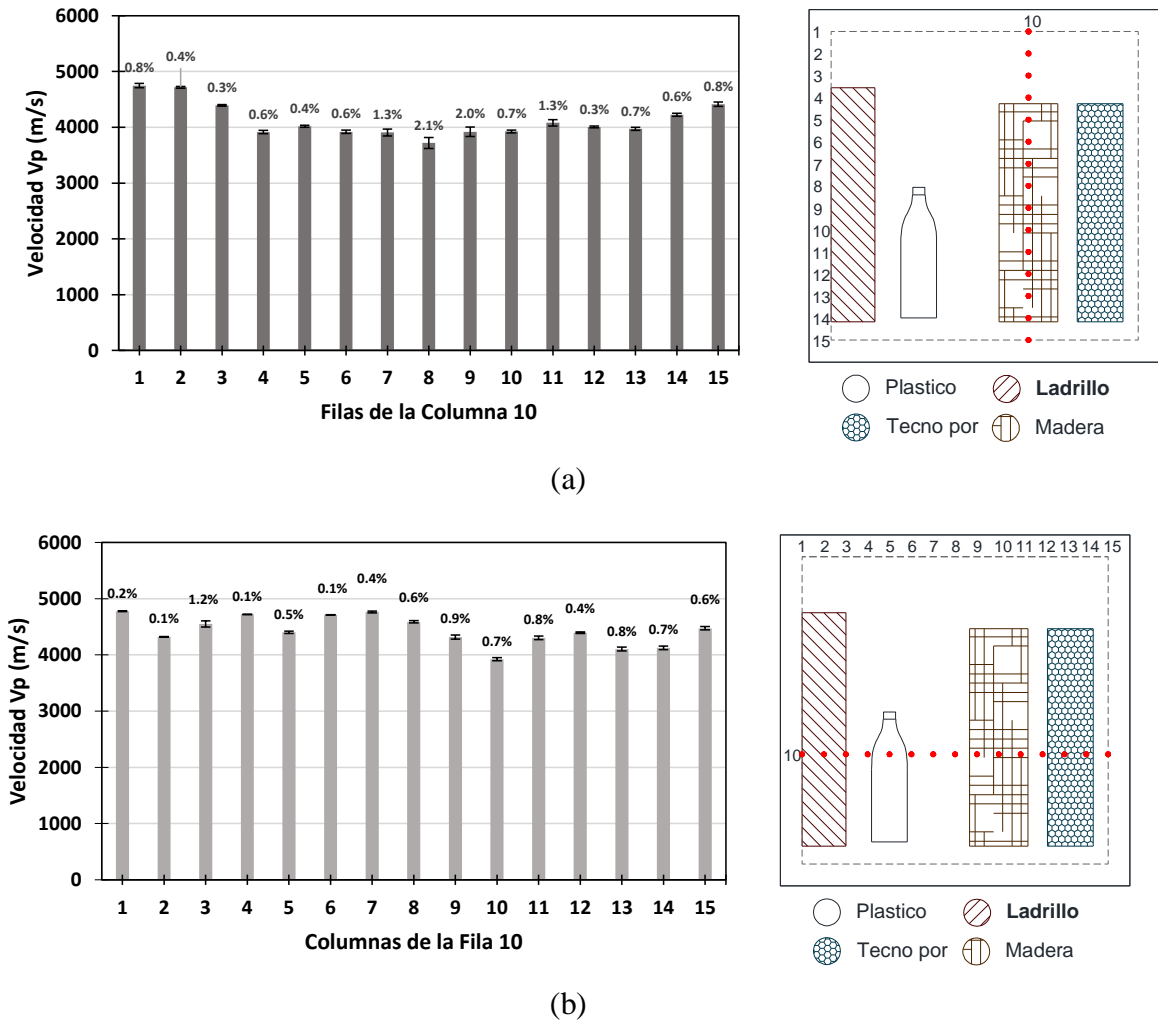


Figura 4.10 Velocidades de onda P en el muro 1 aplicando ensayos de ultrasonido (a) a lo largo de la fila 10 (b) en la columna 10.

La correspondiente imagen tomográfica de velocidades calculadas con ultrasonido se presenta en la Figura 4.11a. En esta imagen se puede ver que en la zona derecha existe un rango de velocidades entre 4000 y 4400 m/s marcadas desde un color rojo oscuro a un amarillo claro. Esta área corresponde a las zonas donde se encuentran el tecnopor y la madera. La zonas de color azul y celeste tiene velocidades entre 4600 y 5000 m/s que corresponde al concreto, material predominante del muro. Finalmente en la parte izquierda velocidades entre 4000 y 4400 m/s también de un color rojo oscuro muestran el lugar donde

se encuentra el ladrillo. En esta imagen también se puede ver ligeramente donde se encuentra la botella en la parte central izquierda del muro (Ver Figura 4.11b).

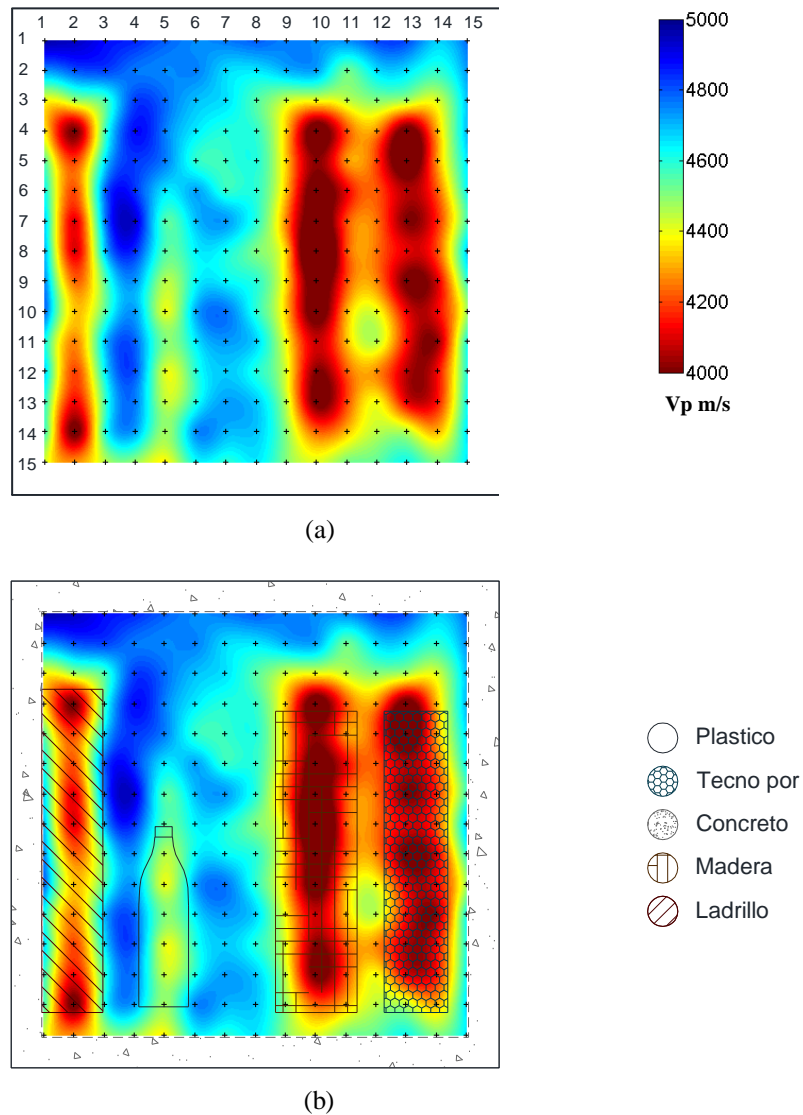


Figura 4.11 Tomografía ultrasónica de la cara lateral del muro 1.(a) velocidades en los 49 puntos de ensayo (b) superposición de imagen con los materiales internos

Al igual que los ensayos sónicos, la prueba de ultrasonido permitió determinar los lugares donde se colocaron las irregularidades internas en el muro 1. Para lograr esto, la escala de velocidades de la imagen de ultrasonido fue diferente a la generada por ensayos sónicos. Con esta escala de velocidades se pudo identificar claramente la existencia de irregularidades en el interior del muro. En la Figura 4.11b se puede ver que las irregularidades tienen formas mejor definidas que las de la Figura 4.8b, por lo que en este caso los ensayos de ultrasonido tuvieron una mayor aproximación al estado real del muro 1. Si se comparan ambas imágenes a una misma escala se puede ver que hay una gran diferencia entre ellas. La imagen construida a partir de los ensayos sónicos presenta una mayor claridad a la hora de identificar las irregularidades (Ver Figura 4.12). En cambio en la Figura 4.12b se observa que las velocidades calculadas por ultrasonido son mayores que los resultados de los ensayos

sónicos. Se observa que la totalidad de la imagen está entre 4000 y 5000 m/s. En este caso los ensayos de ultrasonido fueron mayores en promedio en 22%, 39%, 48%, 40% en los puntos correspondientes a las zonas donde se encontraron las irregularidades como el ladrillo, la botella de plástico, la madera y el tecnopor respectivamente. En las zonas donde el concreto era el único material las velocidades ultrasónicas fueron en promedio un 11% mayor que las velocidades calculadas usando ensayos sónicos.

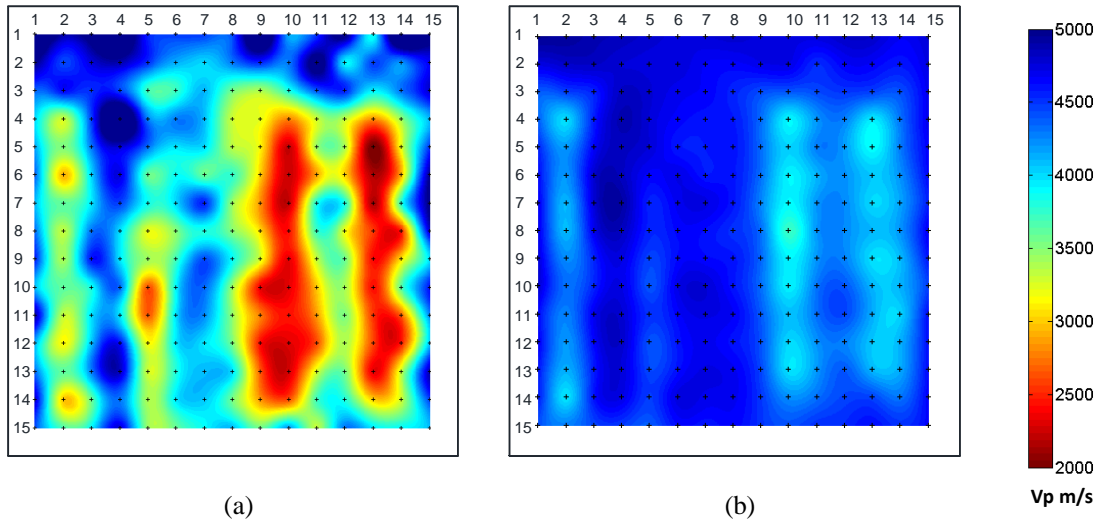


Figura 4.12 Imágenes a una misma escala gráfica (a) Tomografía sónica (b) Tomografía ultrasónica.

4.6.2 Resultados de la evaluación del muro 2

El muro de prueba 2 (muro 2) fue dividido en 5 zonas basadas en la predominancia del material que lo conforman. En la Figura 4.3d de izquierda a derecha se puede ver que existen regiones de concreto, albañilería, piedra, cantería y adobe. En cada una de ellas se efectuaron ensayos sónicos y ultrasónicos directos.

En una primera etapa se realizaron pruebas de ultrasonido a los materiales correspondientes a los defectos internos como los bloques de madera y concreto así como también al mortero de cemento para la albañilería y la piedra (ver Figura 4.6). Los resultados de estos ensayos se presentan en la Tabla 4.2. En cada tipo de material se calcularon velocidades en 3 puntos diferentes. Los coeficientes de variación fueron menores a 4 % en todos los casos.

Tabla 4.2 Velocidades de materiales internos del muro 2 (m/s)

Parámetro	Prismas de madera	Bloques de concreto	Mortero	
			Albañilería	Piedra
Vp	1660	4380	4330	3340
CV	4%	2%	2%	2%

Luego ensayos sónicos se aplicaron en cada una de las cinco zonas del muro usando la malla de la Figura 4.5b haciendo un total de 220 puntos. En cada punto se registraron 10 señales y se calculó el tiempo de viaje de las ondas mecánicas (Δt) por diferencia de tiempo. Las velocidades calculadas en las zonas de concreto, albañilería, piedra, cantería y adobe se presentan en las Tabla A. 4, Tabla A. 5, Tabla A. 6, Tabla A. 7 y Tabla A. 8 respectivamente.

Estos valores se calcularon con las longitudes de la Tabla A. 1 y la ecuación (1). Los porcentajes entre paréntesis indican los coeficientes de variación calculados (Ver Anexos del capítulo 4).

Imágenes tomográfica de las caras laterales de cada una de las zonas del muro 2 se crearon utilizando los valores de velocidad de las tablas anteriores. Los resultados se presentan en la Figura 4.13 y se compararon con el estado interno de cada zona del muro.

En la Figura 4.13a la cual pertenece a la zona de concreto se puede ver que las áreas celestes y azules corresponden a velocidades mayores a los 4700 m/s. Estas velocidades están asociadas a zonas donde el concreto es el único material presente. En la parte superior se observa una ligera disminución de la velocidad entre de 4400 y 4500 m/s. Esta área está asociada a la ubicación del bloque de madera y vacío interno puestos dentro del muro. En la parte intermedia baja donde se encuentra el bloque metálico la velocidad es aproximadamente 4800 m/s. En esta imagen también existen zonas con velocidades cercanas a 5000 m/s, áreas donde talvez hubo una mayor concentración de la pasta de cemento.

En la parte media de la zona de albañilería se han calculado velocidades cercanas a los 3500 m/s (ver Figura 4.13b). Pero estas áreas de color celeste no pertenecen al bloque de concreto, sino más bien la rodean. En el lugar donde se encuentra este bloque las velocidades obtenidas varían entre los 2900 y 3200 m/s. También velocidades aproximadas de 2500 m/s se obtuvieron en el área donde se encuentra el vacío. Este valor es un poco menor respecto de los 2700 m/s que representadas de color amarillo oscuro y que están ubicadas en donde sólo se encuentra ladrillo y mortero. Por último en la parte superior velocidades entre 2100 y 2400 m/s se detectaron en la zona donde se ubicó el bloque de madera y también en los puntos cercanos a este.

Al observar la Figura 4.13c resalta de inmediato las velocidades menores a 3500 m/s que se observan en la parte superior e intermedia donde se colocaron el bloque de madera y el vacío. Este último se ha detectado parcialmente ya que velocidades aproximadas de 4600 m/s se calcularon en la parte izquierda. Las áreas de color azul y celeste corresponden a zonas donde predomina únicamente la piedra y el mortero con velocidades entre 4500 y 5000 m/s En la zona donde se colocó el bloque de concreto las velocidades calculadas se encuentran en este rango. Pero una velocidad de 3600 m/s se obtuvo en uno de los puntos lo que hace variar drásticamente la imagen.

Hasta ahora las tomografías de las caras laterales de las zonas de concreto, albañilería y piedra han mostrado parcialmente la ubicación de los defectos colocados en su interior. Pero las imágenes que se presentan en las Figura 4.13d y Figura 4.13e muestran mejores resultados acorde a la lógica esperada.

En el zona predominada por cantería, velocidades bajas de aproximadamente de 1300 m/s se calcularon en donde se ubicó el bloque de madera (Ver Figura 4.13d). Las áreas de color celeste y azul representan velocidades mayores a 1700 m/s que son lugares donde sólo se encuentra cantería y mortero de cal. Una velocidad aproximada de 1450 se obtuvo en el área donde se colocó el vacío. Y velocidades cercanas a 1800 m/s se calcularon en el área correspondiente al bloque de concreto.

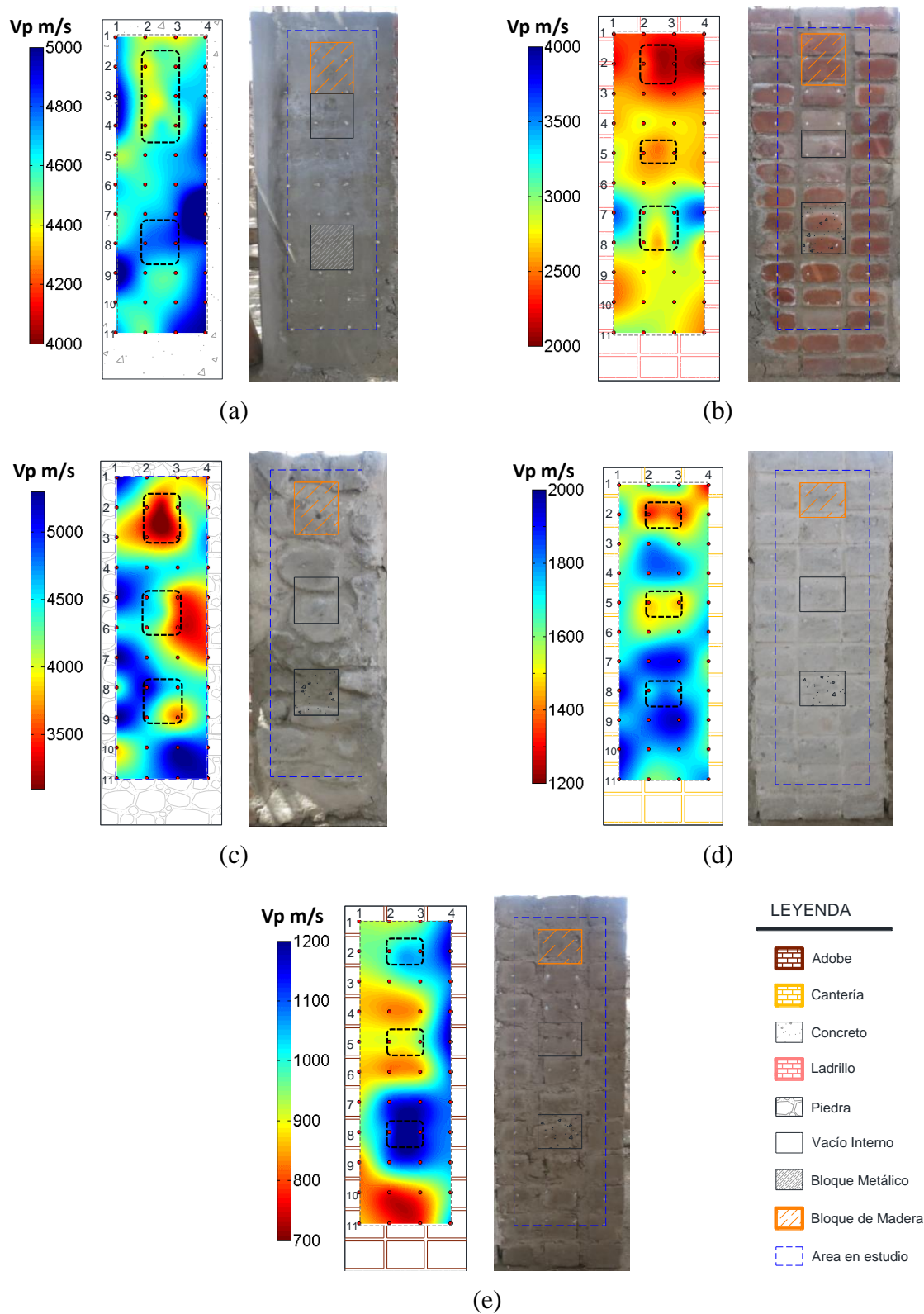


Figura 4.13 Imágenes tomográficas de las caras frontales del muro 2 utilizando ensayos sónicos. En (a), (b), (c), (d) y (e) se comparan las imágenes con los defectos internos en las zonas de concreto, ladrillo, piedra, cantería y adobe respectivamente.

De igual forma en la Figura 4.13e se puede ver que velocidades mayores a las zonas donde se encuentra únicamente adobe (700 a 900 m/s) fueron calculadas en el lugar donde se colocó

el bloque de madera. Esto se explica ya que la madera tiene por velocidad de onda P 1660 m/s (Ver Tabla 4.2) y es mayor a la del adobe. El mismo resultado se observa en la parte baja donde se encuentra el bloque de concreto con velocidades calculadas de aproximadamente 1100 m/s. En este caso estas velocidades abarcaron un área mayor a la esperada. Finalmente en la zona intermedia donde se colocó el vacío se obtuvieron velocidades de 900 m/s las cuales son parecidas a las zonas donde se encuentra únicamente el adobe.

Ensayos de ultrasonido también se llevaron a cabo en el muro de prueba 2. Únicamente se pudo calcular el tiempo de propagación de las ondas (Δt) en las zonas de concreto y albañilería. En la piedra, cantería y adobe no se pudo obtener Δt debido a la pérdida de energía y a la atenuación de las ondas ultrasónicas en estos materiales.

En las Tabla A. 9 y Tabla A. 10 se muestran las velocidades en las zonas de concreto y albañilería (Ver Anexos del capítulo 4). Los valores en paréntesis son los coeficientes de variación calculados en cada uno de los puntos. Todos los CV calculados son menores a 1% en el la zona de concreto. Pero en ladrillo se han calculado valores de hasta 7%, esto debido a que en aquellos puntos la señal adquirida tenía amplitudes muy bajas y determinar el tiempo de propagación fue difícil.

Al comparar los resultados de las Tabla A. 4, y Tabla A. 9 de la zona de concreto se puede ver que las velocidades calculadas utilizando ensayos sónicos son hasta un 20% mayor a las velocidades calculadas por ultrasonido. Pero en ladrillo (Ver Tabla A. 5 y Tabla A. 10) algunos puntos son más elevados hasta en 80%.

Las correspondientes imágenes creadas a partir de ensayos ultrasónicos se presentan en la Figura 4.14.

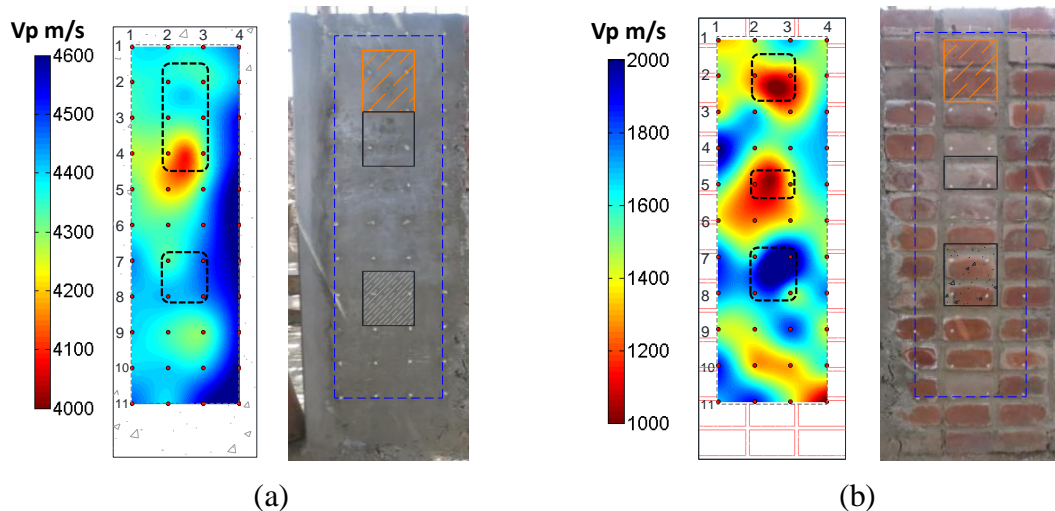


Figura 4.14 Imágenes tomográficas utilizando ensayos ultrasónicos de la cara lateral del muro 2, (a) zona de concreto, (b) zona de ladrillo.

Capítulo 5

Ensayos sónicos, de ultrasonido y de Impacto eco para estudiar el material y sub-elementos estructurales en Huaca de la Luna.

Resumen

El complejo arqueológico Huaca de la Luna es una construcción masiva de adobe construida entre los años 100 y 650 D.C. por la civilización Moche y actualmente es considerado como uno de los sitios arqueológicos más importantes del Perú. Dada su ubicación en la costa peruana, este complejo es vulnerable a los efectos de los sismos que se producen constantemente por la interacción entre las placas de Nazca y Sudamericana. Debido a los peligros a los que se encuentra expuesto, la conservación y protección de este monumento requiere un diagnóstico estructural exhaustivo. Esto implica una apropiada identificación de su condición actual, materiales y sistema estructural. Este capítulo presenta una metodología innovadora para determinar las características mecánicas del adobe mediante la aplicación de ensayos de ultrasonido. Mediante esta metodología se logró obtener satisfactoriamente el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de unidades representativas del adobe de Huaca de la Luna. Se realizaron también ensayos de tomografía ultrasónica para evaluar cualitativamente la variabilidad de cada una de las unidades estudiadas. También se aplicaron ensayos de tomografía sónica a 5 columnas pertenecientes a la Unidad 16 y salas Hipóstilas. Con la data de los ensayos sónicos se pudo determinar la distribución de los adobes en las columnas utilizando la técnica de Impacto eco. Los resultados de este estudio se usarán para posteriores análisis integrales de la seguridad sísmica del complejo y como una línea base para procesos posteriores de determinación in-situ del estado de daño del sistema de albañilería.

5.1 Introducción

La evaluación estructural de construcciones patrimoniales requiere de un estudio detallado de las propiedades mecánicas de los materiales que componen el sistema estructural. Caracterizar apropiadamente los materiales permite elaborar modelos numéricos representativos, realizar un diagnóstico apropiado y posteriormente plantear medidas de intervención para garantizar la integridad del patrimonio.

Una de las principales dificultades durante la etapa de estudio de construcciones patrimoniales es la obtención de muestras del material que las constituyen. Los principios establecidos en la carta de ICOMOS/ISCARSAH, (2005) indican que debe evitarse la alteración de la edificación por lo que la aplicación de técnicas no-destructivas resulta de gran interés.

La presente investigación está centrada en Huaca de la Luna, el cual es un complejo arqueológico que se encuentra ubicado en la costa norte del Perú, a ocho kilómetros de la ciudad de Trujillo, y que fue construido entre los años 100 y 650 D.C. Este monumento fue uno de los templos más importantes de la cultura Moche y destaca por la técnica constructiva de superposición de templos en diferentes periodos (al menos cinco sucesivas etapas se encontraron durante el proceso de excavación). La Huaca tiene una base cuadrada de 87 metros de lado y una altura de 21 metros. En la Figura 5.1a se muestra un modelo tridimensional de la Huaca en su etapa final y además se indican los sectores estudiados en esta investigación. Como se aprecia en la Figura 5.1b, los relieves en sus pinturas murales de cinco colores son los componentes artísticos más destacados (Uceda; Paredes, 1994).

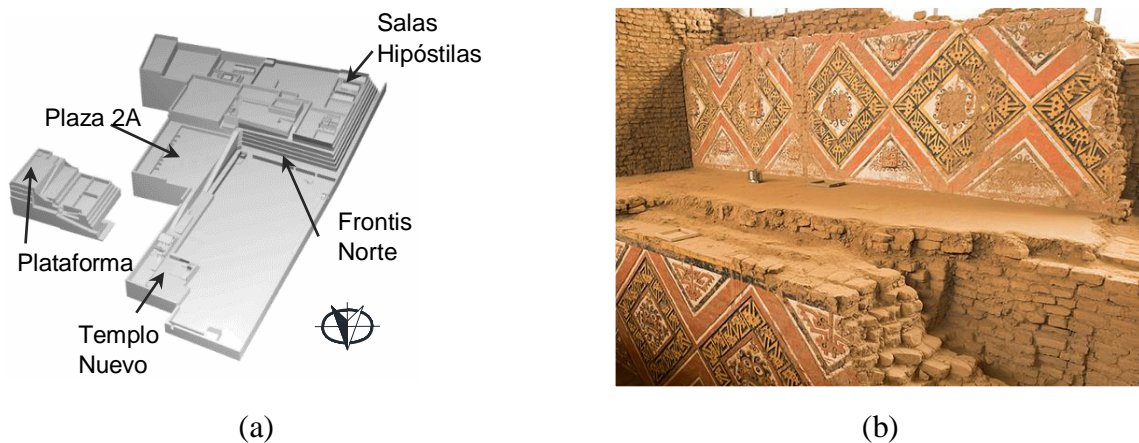


Figura 5.1 Complejo arqueológico Huaca de la Luna: (a) esquema 3D; y (b) mural característico

El presente estudio tiene como objetivo determinar las propiedades mecánicas (módulo de elasticidad y módulo de poisson) de las unidades de adobe del complejo arqueológico Huaca de la Luna. Este trabajo se integró con la campaña de excavación arqueológica que se viene realizando desde inicios de la década de los 90s y para esto se extrajo en 2014 un grupo de 80 adobes de la zona denominada como Templo Nuevo. Los adobes fueron recolectados de la parte media de esta construcción y después fueron trasladados cuidadosamente al laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). La Figura

5.2a y la Figura 5.2b muestran el proceso de extracción y embalaje/transporte de los adobes. Cuatro unidades de este grupo fueron escogidas como representativas para determinar su densidad, contenido de humedad y módulo de elasticidad. Adicionalmente se realizaron medidas de variabilidad dimensional y tomografías ultrasónicas para determinar la homogeneidad de todo el grupo de adobes. Ensayos sónicos fueron llevados a cabo en 5 columnas ubicadas en las Salas Hipóstilas y Unidad 16 con el fin de crear imágenes tomográficas y determinar su estado interno. Los registros obtenidos de las pruebas sónicas fueron analizados mediante la técnica de Impacto eco para determinar la distribución de los adobes en el interior de las columnas.

5.2 Análisis de las unidades de adobe

5.2.1 Descripción de los ensayos realizados y material utilizado

El tipo de material predominante que conforma los adobes de Huaca corresponde a un suelo areno arcilloso que tiene 85% de arena y un 15% de finos (PHLL, 2008). Se realizó un estudio de variabilidad dimensional, densidad y contenido de humedad de los adobes de este complejo arqueológico.

Tal y como muestra la Figura 5.2c, los adobes de Huaca de la Luna presentan una geometría irregular. Para estudiar la variabilidad dimensional se realizó un proceso continuo de medida con cinta métrica en las 80 unidades de adobe. La medición se llevó a cabo por dos meses en laboratorio siendo las temperaturas máxima y mínima registradas de 28.3 y 22.5 °C, respectivamente.



Figura 5.2 Especímenes de adobe de la Huaca de la Luna (a) proceso de obtención (b) protección para el traslado

Por otro lado, para la determinación de la densidad y del contenido de humedad se seleccionaron cuatro adobes de donde se extrajeron 14 prismas regulares de aproximadamente 110 x 51 x 45 mm (ya previendo los ensayos posteriores de ultrasonido) con un proceso de corte manual, tal y como se muestra en la Figura 5.2d. La densidad de estos prismas se determinó siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM D7263 (2009) mientras que el contenido de humedad se realizó tomando en consideración la norma ASTM D4643 (2008).

Como se vio en los capítulos anteriores, el ensayo de ultrasonido es un método no destructivo el cual permite también estimar las propiedades dinámicas de un material así como detectar la existencia de defectos internos. En este ensayo se genera una onda con un contenido de frecuencias mayor a 20 KHz empleando un transductor ultrasónico. La onda viaja a través del material y finalmente es detectada por un receptor como se muestra en la Figura 5.3b. La velocidad de propagación de la onda está en función al material que atraviesa y es por ello que este parámetro se puede relacionar con propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad, densidad y módulo de Poisson (Krautkramer & Krautkramer, 1990).



Figura 5.3 Adobe de Huaca de la Luna, ensayos de caracterización ultrasónica: (a) muestras de adobe (b) procedimiento de ensayo de ultrasonido

Cuando se realizan ensayos de ultrasonido para la medición de la velocidad de ondas de corte, las ondas *P* generadas por los transductores de ondas *S* dificultan la determinación del tiempo de propagación. Este fenómeno se observa en la Figura 5.4a, siendo en todos los casos la onda *P* la primera en ser registrada incluso cuando se usaron transductores de corte. La identificación del tiempo de viaje de la onda *S* se determinó realizando un barrido manual de frecuencias que permitió distinguir la llegada de ambos tipos de ondas. Para esto, se asume que dentro del rango de frecuencias utilizadas en este método, el tiempo de viaje se mantiene independiente de la frecuencia de entrada aplicada (Viana da Fonseca, Ferreira, & Fahey, 2009). En la Figura 5.4a la línea punteada vertical a la derecha indica el tiempo de arribo de la onda *S* al transductor.

En el presente caso de estudio se realizaron ensayos de ultrasonido directo utilizando el equipo de medición PunditLab+. La frecuencia de muestreo a la cual se registraron las señales fue de 2 MHz con lo se tiene una aproximación en el tiempo a 0.5 μ s. Se utilizaron transductores de 54 kHz para evaluar la velocidad de onda *P* y transductores de 250 kHz

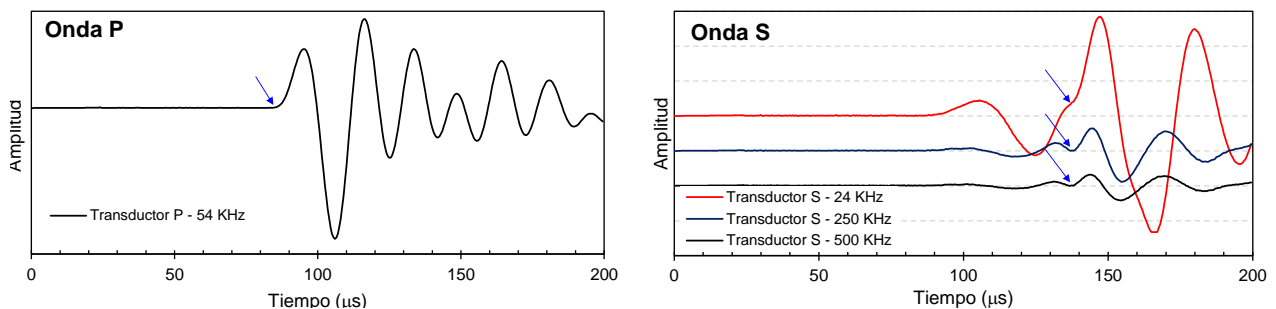
para registrar la onda S . Siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C597 (2009) se utilizó gel acoplante para mejorar el registro.

La longitud de recorrido de la onda usada para los ensayos ultrasónicos fue aproximadamente de 110 mm (Ver Figura 5.3b). Aunque la norma ASTM D2845, (2008) presenta dimensiones mínimas para ensayos de piedra, no existen recomendaciones para ensayos de tierra. En este sentido, diversas investigaciones recomiendan que la longitud mínima de recorrido debe ser dos veces la longitud de onda en el material (Santamarina, Klein, & Fam, 2001); (Leong, Yeo, & Rahardjo, 2004), la cual está a su vez relacionada con la frecuencia y la velocidad de propagación por la siguiente expresión:

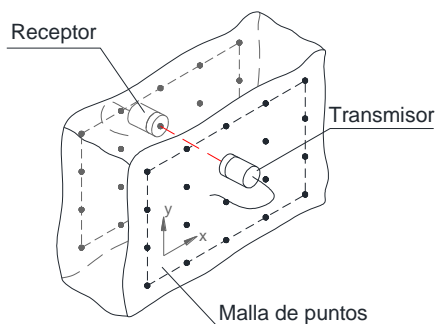
$$\lambda = \frac{V_{P,S}}{f} \quad (7)$$

Donde λ es la longitud de onda en [mm], f es la frecuencia en [kHz] y $V_{P,S}$ es la velocidad de onda P o S en [m/s].

En ensayos preliminares en adobes de Huaca de la Luna se obtuvo una velocidad de onda P de 1300m/s utilizando una frecuencia de 54 kHz. Utilizando estos resultados y aplicando la ecuación (7), se determinó que la longitud de onda es aproximadamente 24 mm por lo que la longitud mínima de ensayo sería de 48 mm. Este resultado valida los resultados de estos ensayos en los prismas de 110 mm.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.4 Ensayos de ultrasonido (a) Resultados de onda P para 54 kHz y onda S para 24 kHz y 250kHz (b)configuración de ensayo de tomografía ultrasónica(c) Toma de datos para la tomografía

Cuando se calculan las velocidades en diversos puntos del elemento en estudio gráficos en 2D o 3D (dependiendo de si se realizan ensayos directos o indirectos) denominados tomografías ultrasónicas. Una tomografía es una herramienta que reproduce la estructura interna de un elemento a partir de mediciones recogidas en su superficie externa (Binda, et al., 2003b). Los resultados de una tomografía pueden ser presentados como mapas de velocidades que están asociadas a la heterogeneidad del material o la presencia de grietas y defectos.

Para el caso de este estudio, se realizaron ensayos con fines de tomografía en el grupo total de 80 adobes disponibles en laboratorio. Debido a la variabilidad de las dimensiones de los adobes, se utilizaron 3 tipos de mallas para realizar los ensayos: tipo 1 (65 mm x 60 mm), tipo 2 (60 mm x 50 mm) y tipo 3 (60 mm x 60 mm) siendo los valores en paréntesis el espaciamiento entre puntos en dirección X y Y respectivamente (ver Figura 5.4b). En las mallas tipo 1 y 2 se graficaron 5 y 4 puntos en dirección X y Y, respectivamente, mientras que en la malla tipo 3 fueron necesarios 5 y 3 puntos para cada eje. La Figura 5.4c muestra el procedimiento de ensayo en cada punto.

5.2.2 Resultados y discusión

De la medición del tamaño del grupo total de 80 adobes se obtuvo que en promedio estos tienen un largo de 320 mm con un Coeficiente de Variación (CV) del 5.2% con un máximo y mínimo de 360 mm y 280 mm respectivamente, un ancho de 220 mm con un CV del 7.4% con un máximo y mínimo de 270 mm y 180 mm respectivamente y una altura de 120 mm con un CV del 11.9% con un máximo y mínimo de 150 mm y 75 mm respectivamente.

La densidad promedio encontrada fue de 1750 kg/m³ con un CV del 4% con un máximo y mínimo de 1941 kg/m³ y 1664 kg/m³ respectivamente. Estos valores son similares a los reportados en informes previos en los cuales se estudia la densidad de los adobes de los sectores conocidos como Frontis Norte, Plaza 2A, Plataforma III y Salas Hipóstilas, encontrándose valores de 1800, 1880, 1830 y 1970 kg/m³ respectivamente (PHLL, 2008).

Los valores calculados para el contenido de humedad están en el rango de 1.7% a 2.1% con un promedio de 1.9% y presentan un CV del 14%. Valores similares fueron reportados para los sectores Frontis Norte, Plaza 2A, Plataforma III y Salas Hipóstilas que muestran valores del contenido de humedad de 1.69%, 2.38%, 1.78% y 2.62%, respectivamente (PHLL, 2008).

El resumen de los resultados de los ensayos de ultrasonido se presenta también en la Tabla 5.1. Como se ve, la velocidad promedio de la onda *P* tiene un valor de 1350 m/s con un CV de 3.5% con valores mínimos y máximos de 1270 m/s a 1450 m/s, respectivamente. Por otro lado, la velocidad de onda *S* promedio fue de 850 m/s con un CV de 5.6%, en este caso la velocidad mínima fue de 750 m/s y la máxima de 950 m/s. Los bajos coeficientes de variación obtenidos confirman la robustez del método. Haciendo uso de la ecuación (4) se calculó el módulo de Poisson para cada una de las muestras. En este caso, el valor promedio hallado fue de 0.16 con un CV de 22%. Además, haciendo uso de la ecuación (2) y el valor de densidad promedio de 1750 kg/m³, se calculó que $E_{\text{dinámico}}$ promedio es de 2960 MPa con un CV de 9%.

Tabla 5.1. Resumen de las propiedades mecánicas de los adobes ensayados de Huaca de la Luna

Unidad	Espécimen	V_p (m/s)	V_s (m/s)	$E_{Dinámico}$ (MPa)	ν
Adobe 1	1-3	1364	903	3167	0.11
	1-4	1384	916	3261	0.11
	1-5	1443	952	3536	0.11
	Promedio	1397	924	3321	0.11
Adobe 2	2-1	1272	816	2680	0.15
	2-2	1296	836	2797	0.14
	2-3	1312	857	2898	0.13
	2-4	1273	746	2411	0.24
	2-6	1330	814	2783	0.20
	Promedio	1296	814	2714	0.17
Adobe 3	3-3	1371	857	3032	0.18
	3-5	1361	891	3126	0.12
	3-7	1345	856	2972	0.16
	Promedio	1359	868	3043	0.15
Adobe 4	4-2	1370	802	2788	0.24
	4-3	1344	845	2931	0.17
	4-4	1386	872	3121	0.17
	Promedio	1367	840	2947	0.19
Promedio		1346	854	2965	0.16
Desviación estándar		47	52	277	0.04
CV (%)		4%	6%	9%	22%

Por otro lado, los ensayos directos de ultrasonido en las caras de las unidades de adobe permitieron generar imágenes 2D de velocidades. En la Figura 5.5 se muestran los resultados de cuatro unidades, las tres primeras representativas de la mayoría de especímenes ensayados y la última representativa de un espécimen con problemas de heterogeneidad. Las Figura 5.5a, Figura 5.5b y Figura 5.5c representan a adobes con velocidades de onda P que varían entre 1000 m/s y 1200 m/s, 1200 y 1400 m/s y 1400 y 1600 m/s respectivamente. Estas imágenes indican que los adobes son homogéneos y que posiblemente se encuentran en buen estado ya que no presenta diferencias significativas de velocidades. Por otro lado, en la Figura 5.5d se observa un cambio notable en la parte superior derecha del adobe. Este cambio indica que en dicha zona existen defectos internos que provocan una atenuación de la velocidad de onda. Este tipo de información evidenciaría la existencia de un daño parcial en esta región de la unidad. Los resultados de estos ensayos muestran que, a excepción del adobe que se muestra en la Figura 5.5d, la velocidad máxima registrada fue igual a 1650 m/s y la velocidad mínima fue 900 m/s. Las velocidades más comunes registradas en los puntos ensayados en todos los adobes estuvieron en el rango de 1300 m/s a 1400 m/s.

En la Figura 5.6 se puede ver que un 25% de los adobes tienen valores promedio de velocidad entre 1000 m/s y 1200 m/s, el 65% varía entre 1200 y 1400 m/s y solo el 9% presenta velocidades mayores a 1400 m/s. El 1% faltante corresponde al adobe de la Figura 5.5d y es el adobe que tiene posible daño interno.

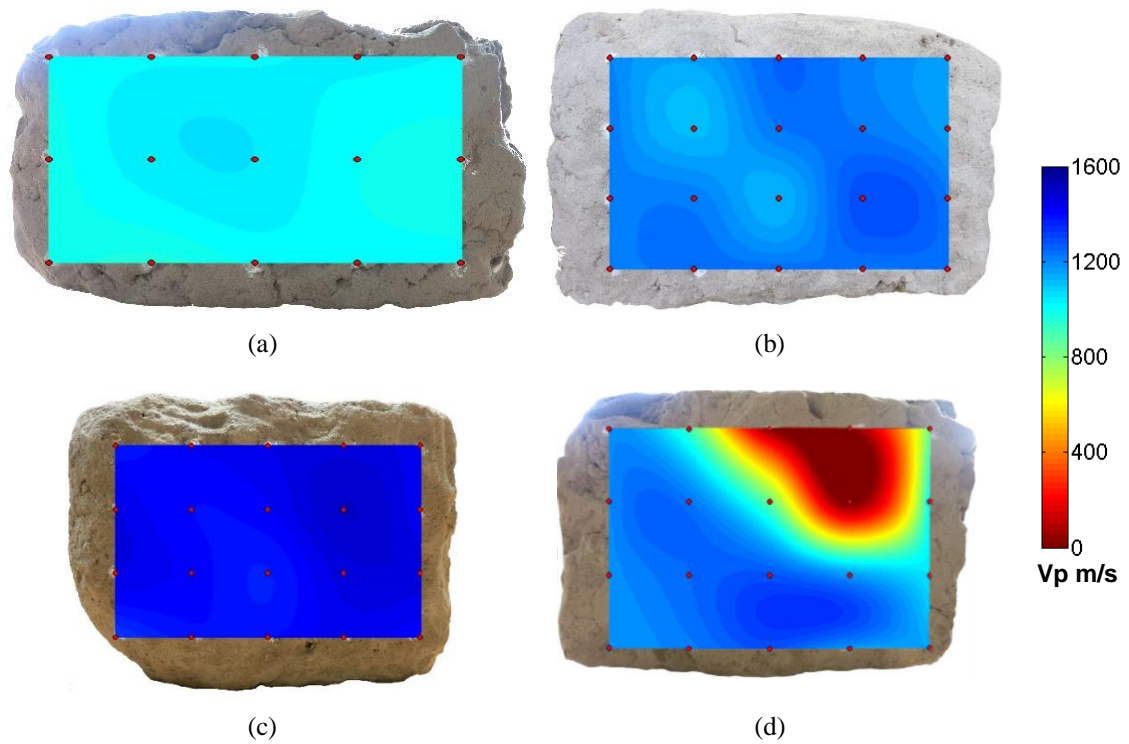


Figura 5.5 Tomografías ultrasónicas. Unidad de adobe con velocidades entre (a) 1000 a 1200 m/s (b) 1200 a 1400 m/s (c) 1400 a 1600 m/s (d) Adobe con características heterogéneas.

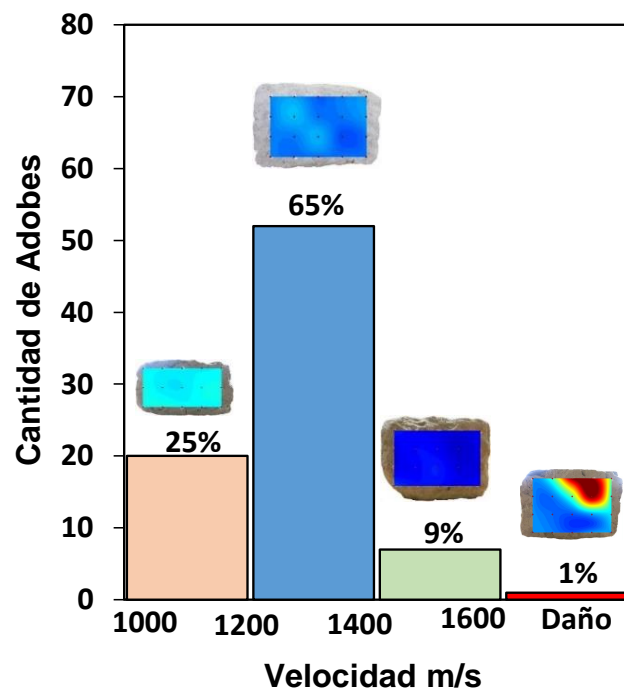


Figura 5.6 Porcentaje de adobes en cada uno de los rangos de velocidades identificados

5.3 Ensayos sísmicos en sub-elementos estructurales

Ensayos sísmicos se aplicaron en algunas subestructuras del complejo arqueológico Huaca de la Luna con el objetivo de realizar una evaluación cualitativa. Cinco columnas, dos ubicadas en las salas hipóstilas y tres en la Unidad 16 fueron evaluadas usando ensayos sísmicos directos. Las columnas estudiadas se muestran en la Figura 5.7

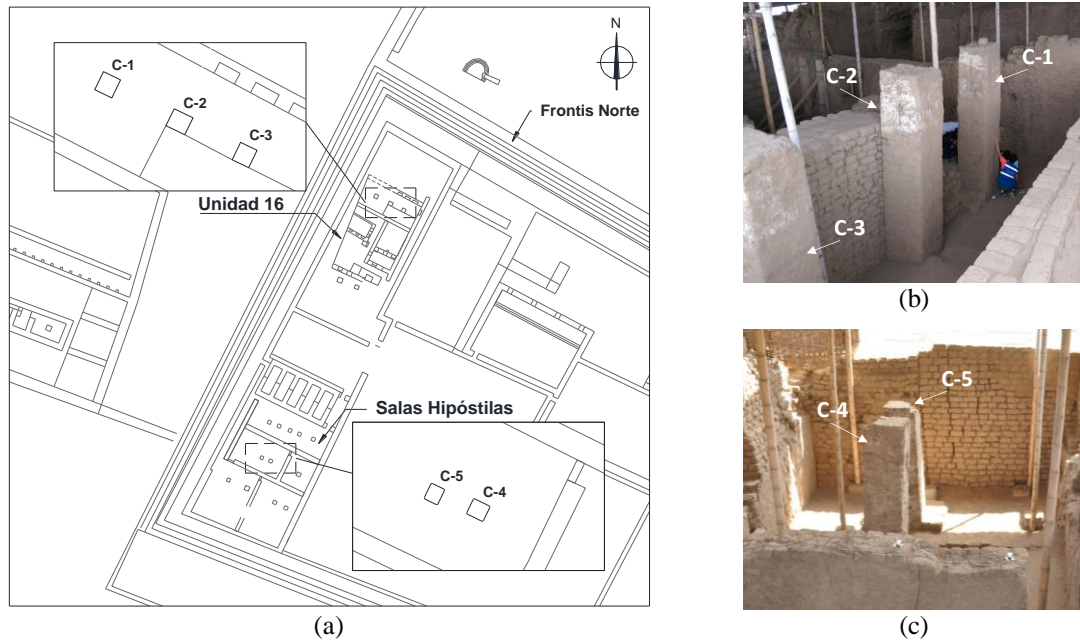


Figura 5.7 Ubicación columnas evaluadas (a) Ubicación (b) Unidad 16 (c) Salas Hipóstilas

Con estos ensayos se determinó la velocidad de propagación de las ondas mecánicas a través del material. Esta información sirvió para crear imágenes en 2D las cuales reprodujeron la estructura interna de las columnas. Se realizaron estos ensayos en ambas direcciones de las columnas C-1, C-4 y C-5, pero en las columnas C-2 y C-3 no se tuvo acceso a una de sus caras debido al muro detrás de las columnas (Ver Figura 5.7b).

5.3.1 Registro de datos

Las mallas empleadas en el programa experimental tuvieron un área de 0.45x1.00 m en cada columna. Se dibujaron seis filas espaciadas 0.20m y cuatro columnas a 0.15m como se indica en la Figura 5.8a. Estas mallas fueron construidas a partir del centro de las columnas hacia las caras laterales. Además la distancia de la primera fila a la base del suelo fue aproximadamente de 0.90 m. El equipo empleado consistió de dos acelerómetros con un rango de frecuencias de 15 kHz y un martillo de acero con el que se produjeron los impactos. La frecuencia de muestreo fue de 51.2 kHz y se utilizó el equipo adquirente de datos NI 9234.

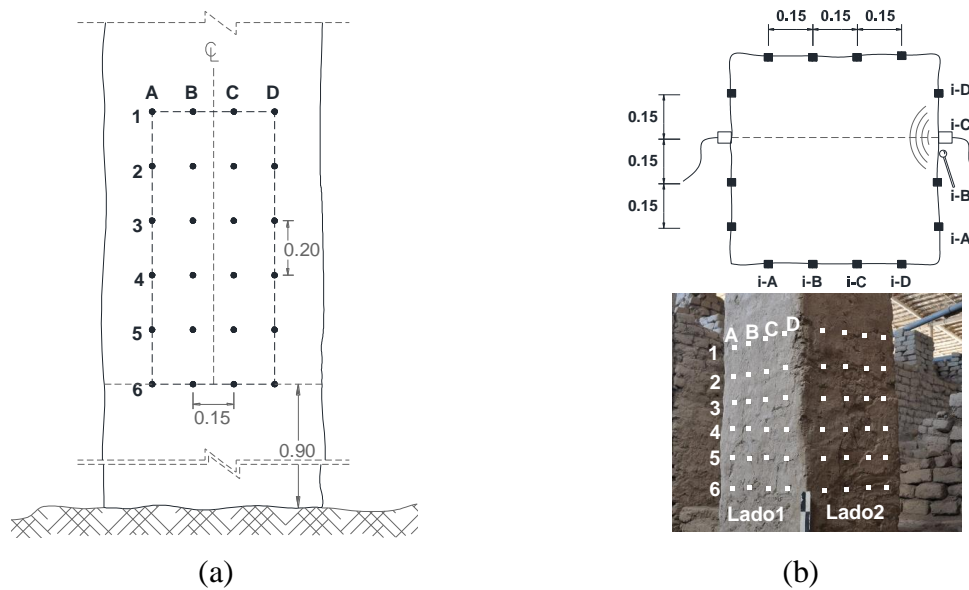


Figura 5.8 Mallas para toma de datos en columnas (a) malla de 0.45x1.00m (b) Configuración de ensayo.

Una vez ubicadas las mallas en las columnas se tomaron las longitudes entre puntos opuestos. Al promediar estas mediciones, las columnas de la Unidad 16 tuvieron en promedio secciones de 0.80x0.80 m y las de las salas Hipóstilas de 0.70x0.70 m. Con estas medidas y el tiempo de propagación obtenido en cada punto se calcularon las velocidades de las Tabla A. 11 a la Tabla A. 15 (Ver Anexos del capítulo 4). Los valores entre paréntesis corresponden los CV calculados en cada punto.

5.3.2 Resultados y discusión

El promedio de velocidades en la columna C-1 fue aproximadamente de 610 m/s. La velocidad mínima calculada fue de 350 m/s y la máxima de 1030 m/s. Similares resultados se calcularon en la columna C-2 en donde el promedio fue de 670 m/s en un entre 320 y 1120 m/s. En la columna C-3 se obtuvo un promedio mayor igual a 730m/s en un rango de velocidades que estuvo entre 290 y 1430 m/s. Velocidades menores se determinaron en las columnas de las salas Hipóstilas en donde la columna C-4 y C-5 tuvieron como promedio velocidades de 480 y 510 m/s respectivamente. El rango de velocidades fue de 250 a 1100 m/s en ambos casos. En todas las columnas se puede ver también que los coeficientes de variación calculados en todos los puntos son menores al 10% e incluso en muchos de ellos son iguales a 1%.

Imágenes en 2D fueron creados a partir de los resultados de los ensayos sónicos. Estas imágenes se presentan en la Figura 5.9 las cuales fueron superpuestas en reconstrucciones fotogramétricas de las columnas. Una reconstrucción fotogramétrica es un modelo tridimensional el cual es originado por medio de fotos tomadas sucesivamente desde diferentes posiciones alrededor del objeto en estudio. (Retamozo, et al., 2015)

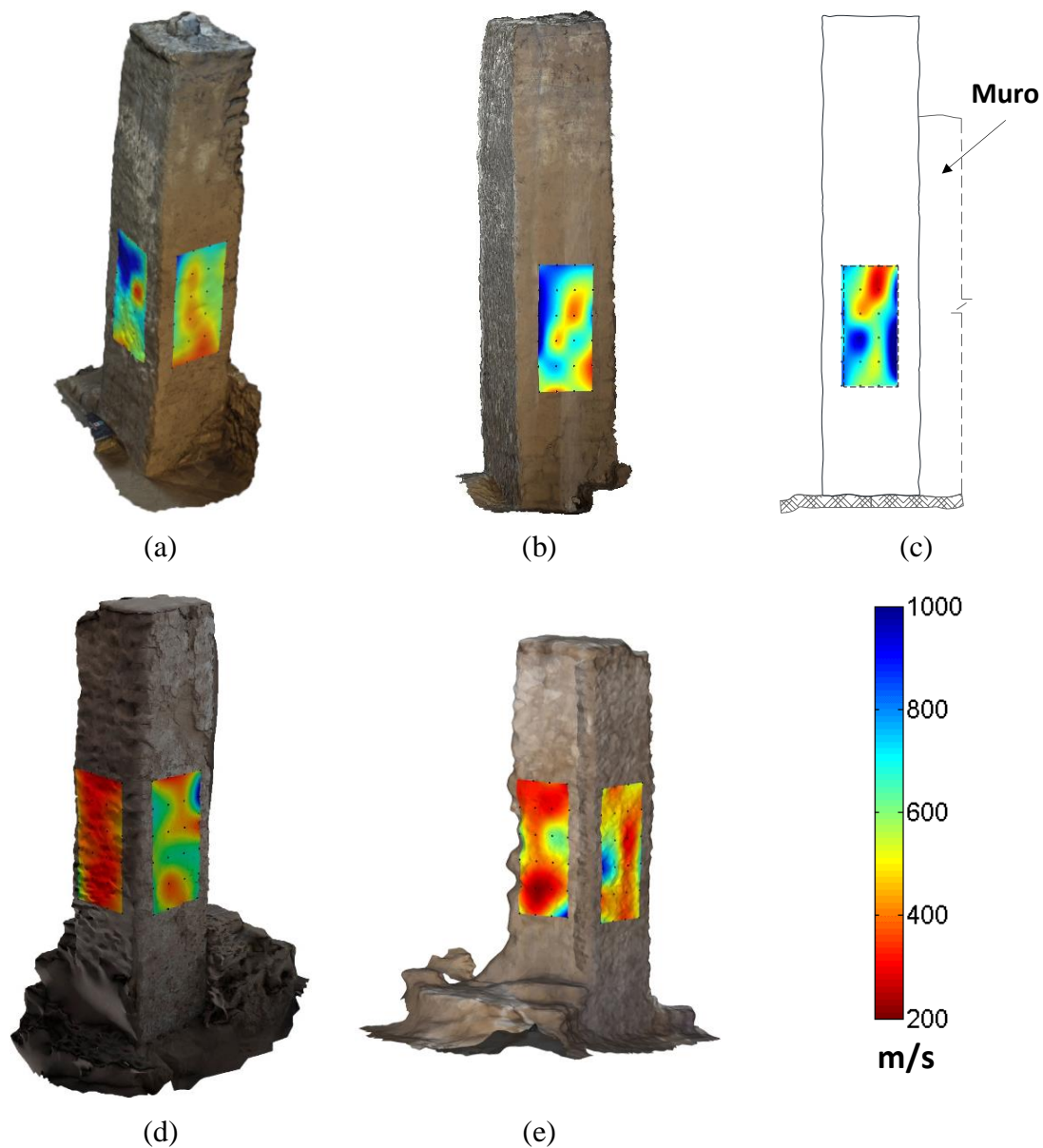


Figura 5.9 Resultados ensayos sónicos directos en las columnas de adobe. Unidad 16 (a) C-1, (b) C-2 y (c) C-3. Salas Hipóstilas (d) C-4 y (e) C-5

En las imágenes anteriores se puede ver que existen áreas de color rojo que corresponden a velocidades entre 200 y 400 m/s. Estos valores indican que estas áreas son zonas vulnerables en las columnas debido a la presencia de grietas o al mal estado interno de los adobes y mortero. Este es el caso de las columnas de las salas Hipóstilas las cuales presentan velocidades más bajas en áreas mayores.

En las columnas de la Unidad 16 (C-1, C-2, C-3) se pueden ver áreas de color azul que corresponden a velocidades entre 800 y 1000 m/s lo cual indica un mejor estado en esa zona. Pero también se observa que en la parte central se observan velocidades cercanas a 400 m/s lo que indica un parcial daño del adobe y/o mortero.

5.4 Impacto eco

Los datos tomados de las columnas aplicando ensayos sónicos se utilizaron para determinar la distribución de los adobes en el interior de ellas. El objetivo fue calcular las dimensiones de los adobes en el interior de las columnas utilizando la técnica de Impacto eco. Esto se pudo lograr debido a la configuración directa empleada en las pruebas sónicas. Como se observa en la Figura 5.10 se posicionaron dos acelerómetros opuestos uno al otro lo que permitió determinar el espesor de los adobes tanto en la parte delantera como en la zona posterior de la columna. La técnica de Impacto eco permite calcular las reflexiones de la onda que se producen entre la superficie del objeto y una capa de material, en este caso una unidad de adobe. Las ondas generadas por el golpe viajan a través de las columnas y generan reflexiones cuando cambian de material, en este caso cuando atraviesan el mortero y otros adobes.

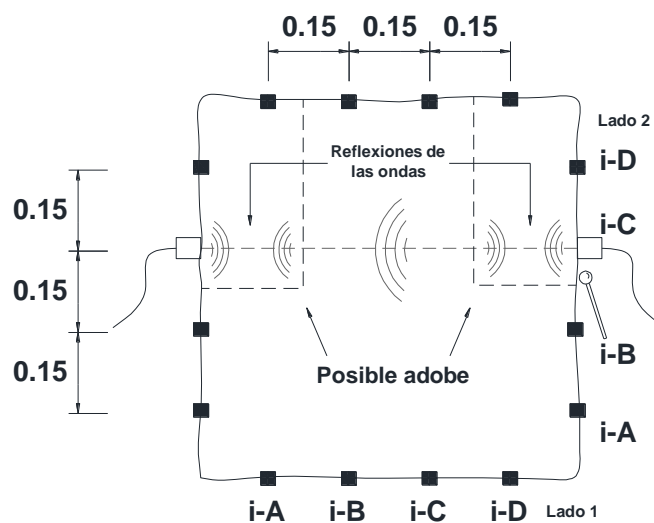


Figura 5.10 Configuración de ensayo de Impacto eco en columna C-1

Como se observa en la ecuación (2) el espesor T del objeto en estudio se calcula conociendo la velocidad del material V_p y la frecuencia de reflexión f de las ondas sónicas.

$$T = \frac{\beta V_p}{2f} \quad (2)$$

El estudio previo realizado al grupo de 80 adobes originales permitió conocer las dimensiones aproximadas de los adobes y la velocidad de propagación de las ondas en este material. La velocidad promedio fue de 1350 m/s (Ver Tabla 5.1). Este valor de velocidad estuvo presente en el 65% de los adobes, pero hay un 35% de adobes que presentan velocidades diferentes. En este estudio se trabajó únicamente con la velocidad predominante de 1350 m/s.

Las dimensiones máximas, mínimas y promedio del grupo de adobes se presentan en la Figura 5.11. El espesor promedio de los adobes fue de 120 mm aproximadamente con un CV de 11.9%.

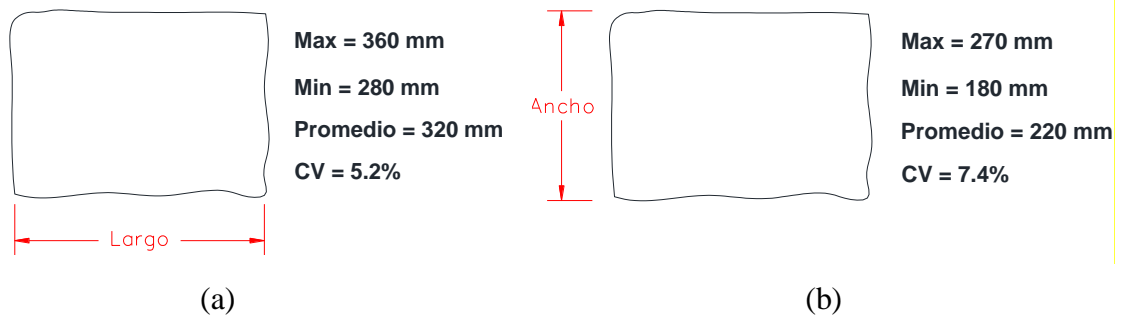


Figura 5.11 Dimensiones de los adobes de Huaca de la Luna (a) Largo (b) Ancho

Con las medidas máximas, mínimas y promedio se realizó una combinación de los posibles tamaños que pueden tener los adobes. Se consideraron entonces 9 adobes los cuales se presentan en la Figura 5.12.

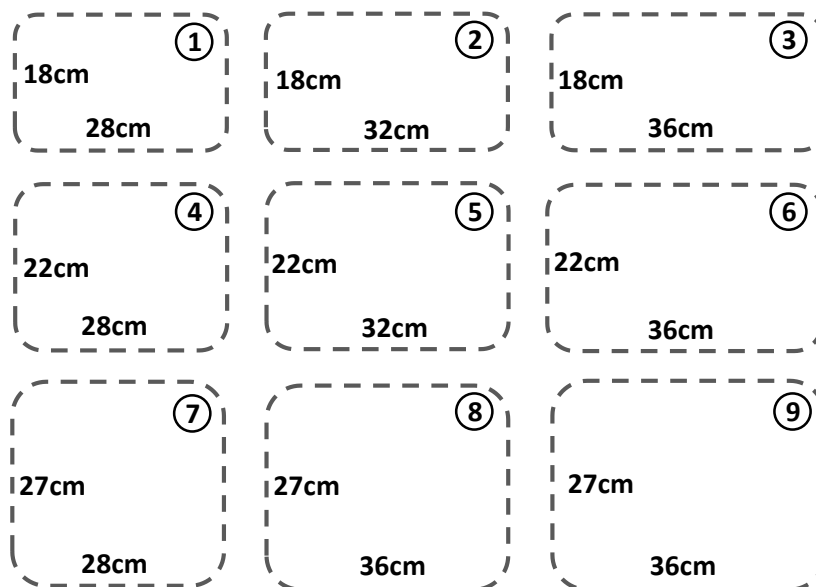
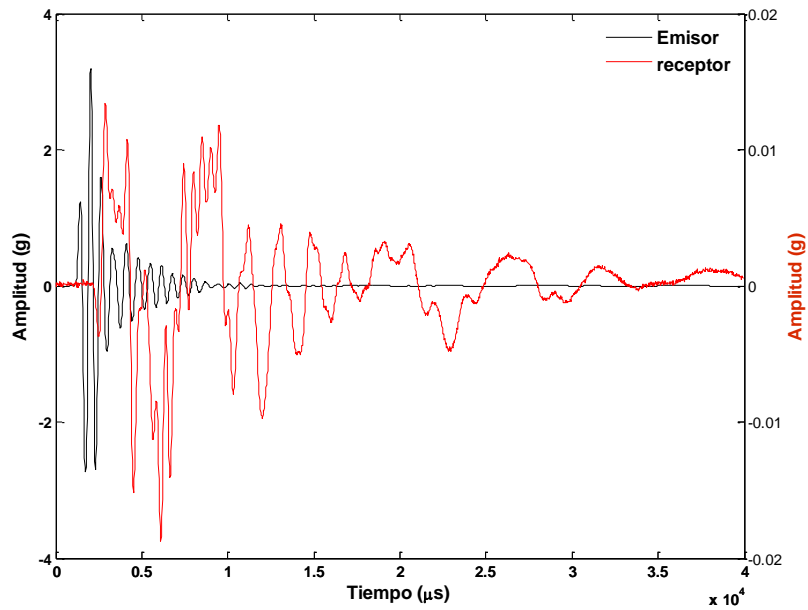


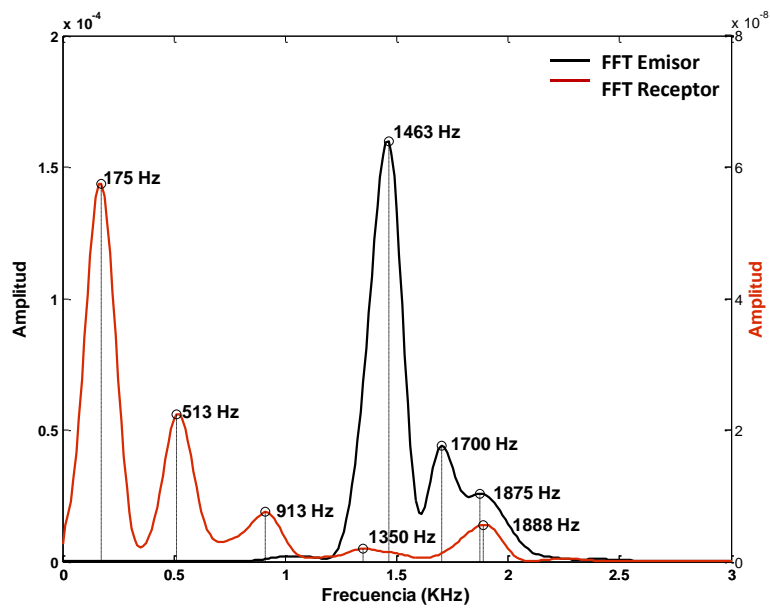
Figura 5.12 Dimensiones de los nueve tipos de adobes considerados para el estudio de Impacto eco.

El siguiente paso fue calcular las frecuencias de reflexión de las señales tomadas en los ensayos sónicos. Para ello se utilizó el algoritmo de FFT en cada uno de los registros usando la metodología de Peter Welch (Welch, 1967). Como parámetros se consideraron ventanas de 512 puntos con 50% de traslape y una frecuencia de muestreo de 51.2 kHz. En la Figura 5.13 se muestra el contenido de frecuencias de una señal de la columna C-1.

En la Figura 5.13a se presentan los registros obtenidos en el dominio del tiempo aplicando ensayos sónicos. La gráfica tiene escalas diferentes en la amplitud, esto debido a que en el punto emisor se genera el golpe y las amplitudes son mucho mayores que en el punto receptor en donde el movimiento percibido es bajo. En la Figura 5.13b se observa el contenido de frecuencias de las señales. En esta imagen se puede identificar claramente las frecuencias con mayor amplitud que corresponden a las reflexiones de la onda en el punto de ensayo en el interior de la columna.



(a)



(b)

Figura 5.13 Análisis del contenido de frecuencias en un punto de C-1 (a) registros en el tiempo (b) FFT

En la Figura 5.13b se puede ver los valores expresados en Hz de las reflexiones más predominantes. Con estos valores de las frecuencias, la velocidad considerada de 1350 m/s se pudo calcular la distancia a la cual se produce la reflexión hasta el punto emisor o receptor usando la ecuación (2). Estos resultados se presentan en la Tabla 5.2 y en la Figura 5.14. Las dimensiones de la sección de la columna C-1 son de aproximadamente 0.80x0.80m por lo que para las frecuencias de 175 y 513 Hz, la distancia calculada hasta el punto receptor es mucho mayor a la longitud de la sección y por lo tanto no puede ser representada.

Tabla 5.2. Distancias de reflexión

Punto	Frecuencia (Hz)	T (m)
Emisor (negro)	1463	0.44
	1700	0.38
	1875	0.35
Receptor (rojo)	175	3.70
	513	1.26
	913	0.71
	1350	0.48
	1888	0.34

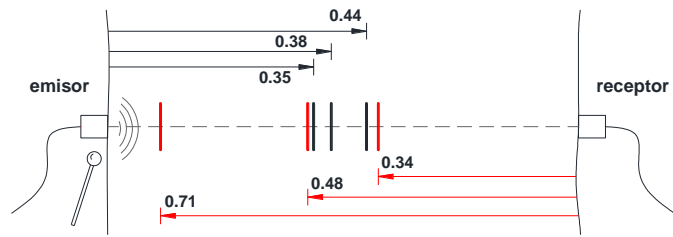


Figura 5.14 Distancias de reflexión entre la superficie y el punto emisor o receptor

5.4.1 Datos analizados

Este procedimiento descrito anterior mente se realizó en cada uno de los puntos donde se efectuaron los ensayos sónicos de las columnas C-1, C-4 y C-5 ya que en estas tres columnas se pudo tomar datos en ambos sentidos (Ver Figura 5.7b).

Para validar la metodología se escogió la columna C1 de la Unidad 16. De esta columna se tomaron los datos de la Fila 2 para ser analizados tanto en el lado 1 como en el lado 2. Se escogieron estos datos debido a que se puede contrastar los resultados en la parte posterior del lado 1 como se observa en la Figura 5.15.

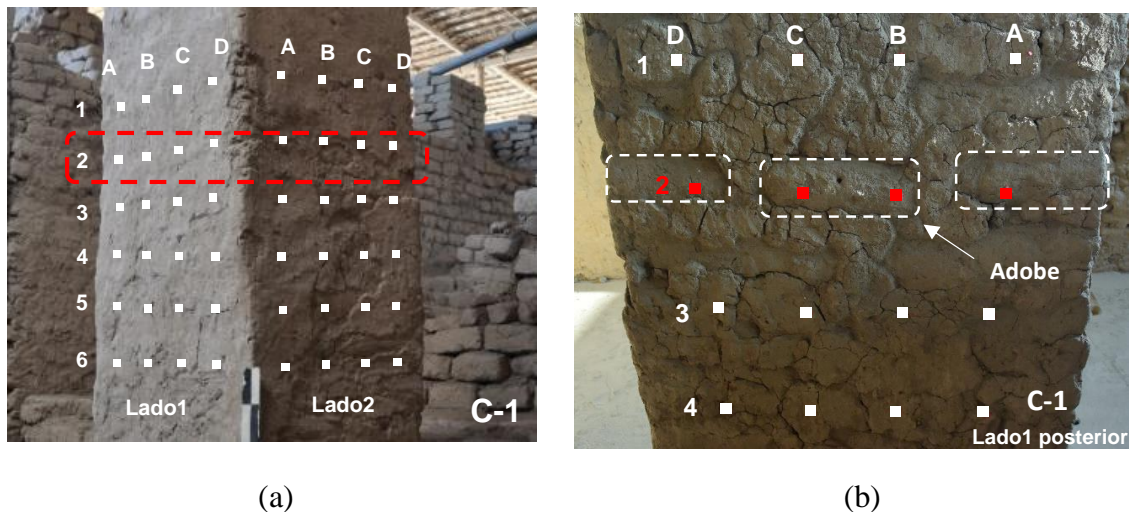


Figura 5.15 Análisis utilizando Impacto eco en la Columna C-1 (a) Sección de columna – Fila 2 (b) Adobes que resaltan en la parte posterior de la columna.

Como ya se mencionó, estos datos fueron tomados previamente en los ensayos sónicos. El equipo empleado consistió de dos acelerómetros con una respuesta de hasta 15 kHz y un martillo de acero con el que se produjeron los impactos. La frecuencia de muestreo fue de 51.2 kHz y se utilizó el equipo adquirente de datos NI 9234.

5.4.2 Resultados y discusión

La técnica de impacto eco fue desarrollada para medir el espesor y la integridad del concreto desde una de sus superficies. Se ha replicado este método para medir las distancias de reflexión entre la superficie y el interior de las columnas de adobe de Huaca de la Luna. El objetivo fue determinar la distribución de los adobes en la sección de la columna al calcular las posibles dimensiones de sus unidades.

En una primera etapa se analizó la fila 2 de C-1 con el fin de contrastar los resultados obtenidos con la parte posterior del lado 1 de la columna. En esta zona se pudo identificar in-situ la presencia de tres adobes (Ver Figura 5.15b). Al analizar los datos de la fila 2 en ambos sentidos de la columna C-1 usando la metodología de Impacto eco se obtuvo la distribución de las unidades de adobe que se presenta en la Figura 5.16.

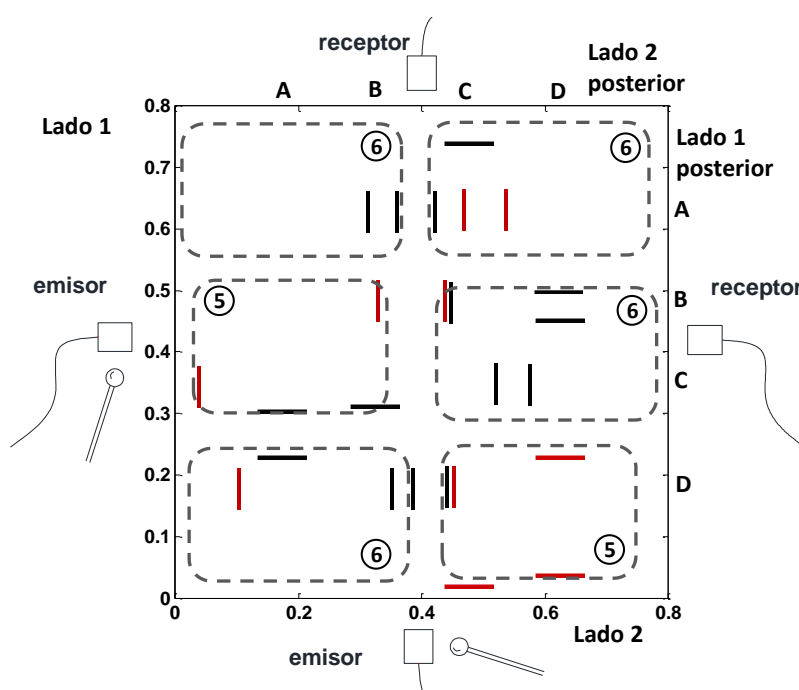


Figura 5.16 Distribución de las unidades de adobe en la fila 2 de la columna C-1

En la Figura 5.16 se han identificado con líneas negras y rojas las reflexiones de la onda al punto emisor y receptor respectivamente. Este análisis se realizó en ambos sentidos de la columna, lado 1 y 2. En base a las distancias calculadas fue posible establecer la distribución de las unidades de adobe en la fila 2 de la columna C-1. En la Figura 5.16 también se observa que existen líneas rojas y negras que no coinciden con los límites de los adobes. Esto se puede explicar debido a que se ha considerado una única velocidad para todo el conjunto de adobes (1350 m/s), se sabe que existe un 35% de adobes que tienen velocidades mayores o menores, por lo que estas distancias serían diferentes. No obstante las reflexiones en esas zonas se pueden deber a cualquier irregularidad interna en las unidades o mortero. En esta sección se han considerado adobes del tipo 5 y 6 (Ver Figura 5.12) con dimensiones de 0.32x0.22 m y 0.36x0.22 m respectivamente.

Al comparar la Figura 5.16 con la Figura 5.15b se puede ver que hay similitud en la distribución de los adobes. Con estos resultados se tuvo mayor confiabilidad para replicar el análisis a todas las filas de la columna C-1, C-4 y C-5.

La distribución de las mallas tuvo un papel importante en este análisis. Las filas fueron espaciadas cada 0.20 m en el eje vertical de las columnas. En el caso de la fila 2 de C-1 los puntos fueron ubicados en los adobes que se muestran en la Figura 5.15b. Las demás filas y columnas estuvieron completamente cubiertas por una capa de mortero por lo que se desconoce si los ensayos atraviesan unidades de adobe o solamente capas de mortero.

En las Figura 5.17, Figura 5.18 y Figura 5.19 se muestran algunos de los resultados del análisis de Impacto eco de las columnas C-1, C-4 y C-5 respectivamente.

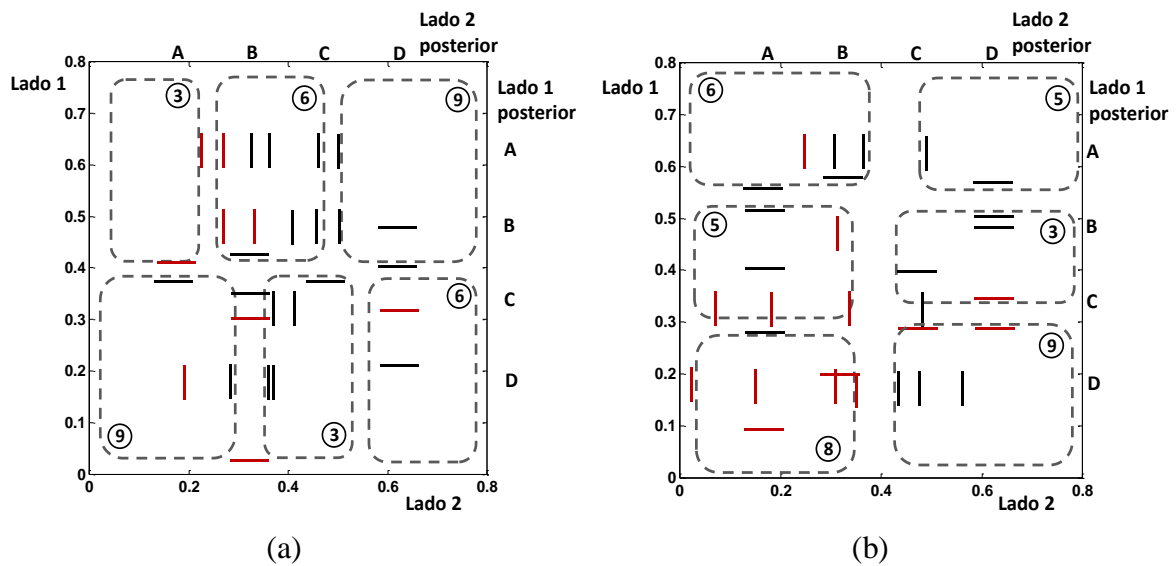


Figura 5.17 Distribución de las unidades de adobe en la columna C-1 (a) Fila 3, (b) Fila 6.

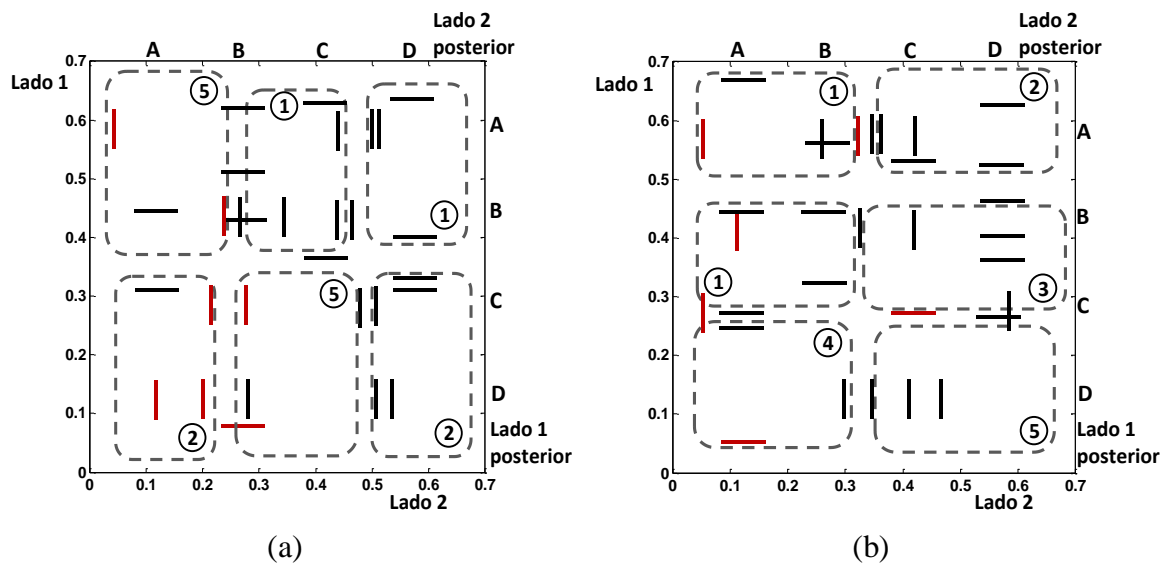


Figura 5.18 Distribución de las unidades de adobe en la columna C-4 (a) Fila 3, (b) Fila 5.

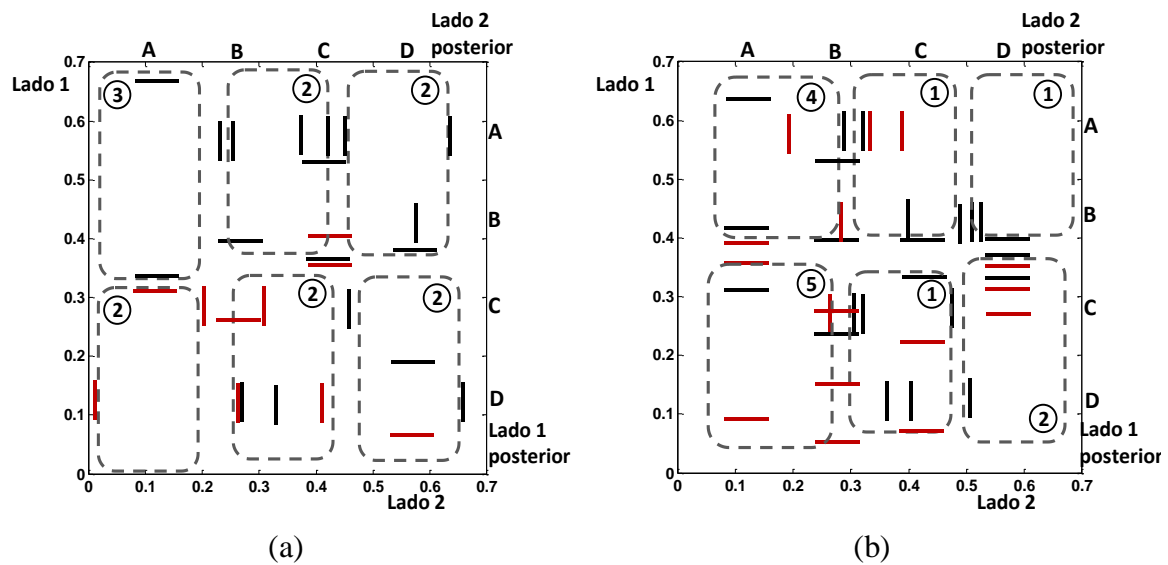


Figura 5.19 Distribución de las unidades de adobe en la columna C-5 (a) Fila 1, (b) Fila 3.

En la columna C-1 se logró identificar la distribución de los adobes en las filas 2, 3 y 6. En C-4 y C-5 el análisis de impacto eco fue satisfactorio en solo dos filas, filas 3 y 5 para C-4 y filas 1 y 3 para C-5.

Estos resultados se obtuvieron al considerar al inicio del estudio los siguientes factores: dimensiones representativas para las unidades de adobe; una velocidad de 1350 m/s la cual representa al 65% de las unidades; la localización de las mallas de los ensayos sónicos de donde proviene la data. Estos factores pudieron incidir en que no se encuentre resultados satisfactorios en el resto de filas de las columnas de Huaca de la Luna.

Capítulo 6

Ensayos sónicos en sub-elementos estructurales de la iglesia de Andahuaylillas.

Resumen

La iglesia de Andahuaylillas es llamada la “Capilla Sixtina de los Andes” por lo hermoso de su pintura mural y su arquitectura que en los últimos años han sido parte de procesos de restauración. Pero no ha habido aún alguna intervención estructural. Es por ello que este capítulo tiene como fin contribuir con el diagnóstico del estado interno de algunos de sus elementos estructurales. Se presenta los resultados de la aplicación de ensayos sónicos directos e indirectos para determinar la velocidad de propagación de ondas P en materiales que conforman la estructura de la Iglesia de Andahuaylillas. Además se logró realizar ensayos sónicos directos con el fin de obtener imágenes tomográficas de uno de sus contrafuertes y de un sector de muro de una de sus capillas.

6.1 Introducción

La iglesia San Pedro Apóstol se ubica a 41 km de la ciudad de Cusco sobre los 3100 m.s.n.m en el distrito de Andahuaylillas. Esta Iglesia es destacada en América y es Patrimonio Nacional del Perú desde 1980. Fue construida por la congregación de los Jesuitas en el siglo XVI sobre una huaca pre-colombina o espacio ceremonial. Esta iglesia es llamada la “Capilla Sixtina de los Andes” por lo hermosos de su pintura mural y su arquitectura (Ver Figura 6.1).

La construcción del templo actual empezó en 1570 con la creación de una pequeña capilla correspondiente al ábside (bóveda) del santuario. La nave y la fachada del santuario fueron construidas en 1606. La estructura de la Iglesia tiene dimensiones de 27 m x 61 m aproximadamente y está conformada por dos sectores: la nave central y el presbiterio. La estructura de la Iglesia está constituida principalmente por muros de adobe de 2 m de ancho. La cimentación es de mampostería de piedra con mortero de barro y tiene una profundidad de 0.50 m aproximadamente. Existen además sobre cimientos con la misma mampostería de piedra que tiene 1m de altura aproximadamente. Los muros de adobe están recubiertos con una capa de yeso decorado de espesor variable. La estructura del techo de la nave está conformada por elementos de madera dispuestos en un arreglo triangular, unidos por un madero horizontal en el tercio superior de su altura. A esta técnica se le conoce como “par y nudillo”. La cobertura es de teja de arcilla cocida tradicional en la zona

La aplicación de ensayos sónicos en la iglesia de Andahuaylillas tiene como objetivo determinar el estado interno de algunos de sus elementos estructurales. Para ello se aplicaron ensayos sónicos directos e indirectos en adobe y piedra. Luego se generaron imágenes en 2D de uno de sus contrafuertes y un muro de sus capillas.



(a)

(b)

Figura 6.1 Iglesia San Pedro Apóstol de Andahuaylillas (a) Foto aérea (b) Interior

6.2 Ensayos sónicos en materiales y sub-elementos estructurales

En primer lugar se aplicaron ensayos sónicos directos a dos piedras y un adobe reconstruido que se encontraban en exhibición en el museo de la iglesia. También se llevaron a cabo ensayos sónicos indirectos en dos piedras de mayor tamaño pertenecientes al sobre-cimiento

de la estructura y en un muro de una de las capillas. Además ensayos directos para obtener tomografías fueron aplicados en uno de los contrafuertes de la iglesia y en un muro de sus capillas. La ubicación de estas pruebas se muestra en la Figura 6.2

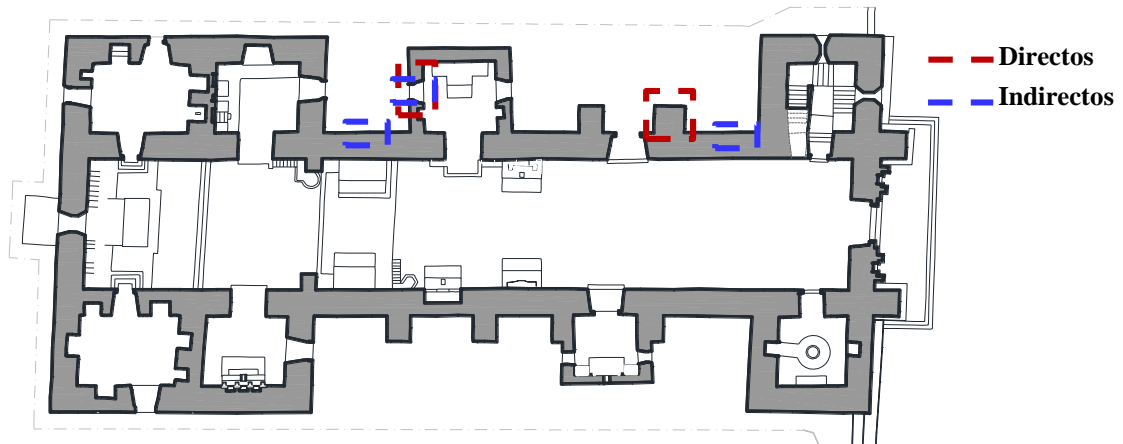


Figura 6.2 Ubicación de ensayos sónico directos e indirectos en la iglesia de Andahuaylillas.

6.2.1 Registro de datos

El equipo empleado en los ensayos sónicos directos consistió de dos acelerómetros piezoeléctricos con una respuesta de hasta 15 kHz. En los ensayos indirectos se utilizaron acelerómetros con respuesta de hasta 2.5 kHz. Se utilizó un martillo de acero para producir los impactos en las muestras de roca y adobe. En los ensayos en los sub-elementos estructurales se utilizó un martillo de goma de mayor peso para generar una mayor energía y no se atenúen las ondas a lo largo del recorrido. Diez señales se registraron de cada punto de ensayo utilizando el adquisidor de datos NI 9234 con una frecuencia de muestreo de 51.2 kHz. En la Figura 6.3 se presenta los elementos en estudio y la configuración de los ensayos.



Figura 6.3 Ensayos sónicos en adobe y piedra. (a) Ensayos directos en adobe (b) Ensayos indirectos en piedras de sobre-cimiento.

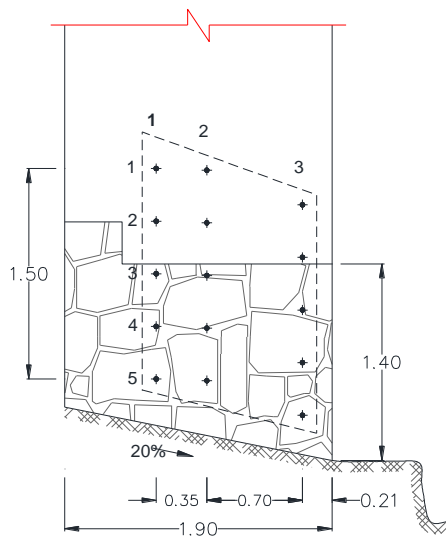
Las pruebas sónicas directas en las piedras 1, 2 y en el adobe se realizaron considerando las longitudes de mayor tamaño de los elementos. El mismo criterio se tuvo para los ensayos

indirectos de las piedras en el sobre-cimiento y en el muro cubierto por revestimiento de yeso. Estas longitudes se presentan en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Longitudes de ensayos sónicos en Andahuaylillas(m)

Directos			Indirectos		
Piedra 1	Piedra 2	Adobe	Piedra 3	Piedra 4	Muro
0.290	0.375	0.780	0.900	0.450	0.750

Se dibujaron dos tipos de mallas para la aplicación de ensayos sónicos directos en el contrafuerte y en el muro de la capilla. En el primero se dibujó una malla de 1.05x1.50 m con un total de 15 puntos. Esta malla tuvo una forma casi regular la cual se puede ver en la Figura 6.4a. En cambio una malla rectangular de 0.25x0.30m se empleó en el muro de la capilla con un total de 54 puntos (6 filas y 9 columnas) y un área de estudio de 2.00x1.50 m.



(a)



(b)

Figura 6.4 Mallas y configuración de ensayos sónicos (a) contrafuerte (b) muro de capilla.

El contrafuerte tuvo un espesor constante de 2.20 m y el muro en la capilla de aproximadamente 1.45 m

6.2.2 Resultados y discusión

Se calcularon las velocidades de propagación de la onda P en las piedras, adobe y muro utilizando el tiempo de viaje obtenido de ensayos sísmicos directos e indirectos. Los resultados se presentan en la Tabla 6.2. Los valores entre paréntesis indican los coeficientes de variación (CV) calculados en cada elemento.

Tabla 6.2. Velocidad de onda P en materiales de Andahuaylillas (m/s)

Directos			Indirectos		
Piedra 1	Piedra 2	Adobe	Piedra 3	Piedra 4	Muro
5194 (7%)	4707 (2%)	688 (6%)	2960 (6%)	2929 (4%)	362 (7%)

Velocidades cercanas a 2950 m/s se calcularon utilizando los ensayos sísmicos indirectos. Esto se hizo en las piedras que se encuentran en el sobre-cimiento de la estructura. En cambio velocidades más altas de aproximadamente 5000 m/s se obtuvieron en piedra utilizando los ensayos sísmicos directos. Este cambio de velocidades indica que puede existir una gran diferencia en valores de resistencia y propiedades mecánicas de las piedras que constituyen la estructura de Andahuaylillas. Por otro lado se obtuvieron velocidades referenciales en adobe y en la superficie de uno de los muros de la capilla.

En el contrafuerte y en el muro de la capilla se calcularon las velocidades que se presentan en las Tabla 6.3 y Tabla 6.4. Entre paréntesis se muestran los coeficientes de variación calculados en cada punto ensayado. Se observa que todos estos valores son menores a 10%.

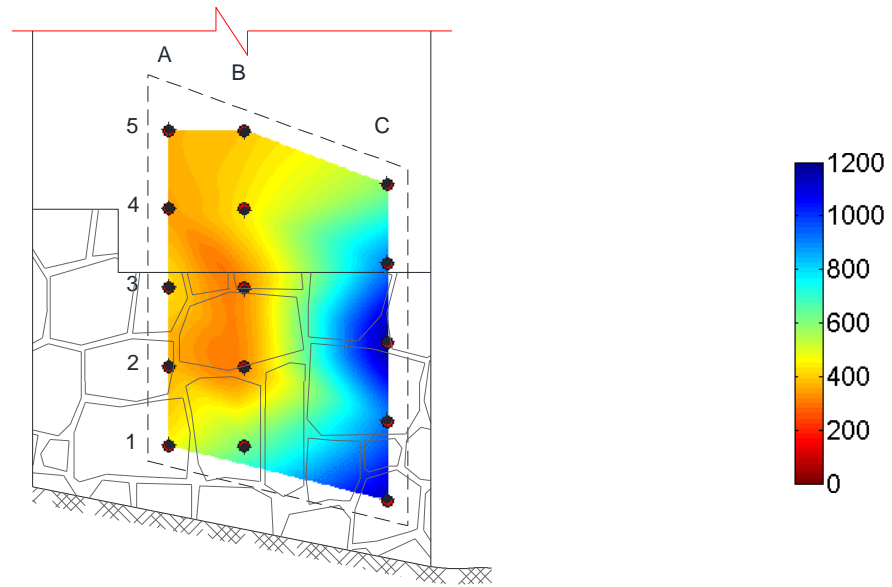
Tabla 6.3. Velocidades en contrafuerte en m/s (CV)

N°	1	2	3
1	366 (7%)	395 (4%)	596 (5%)
2	351 (8%)	435 (4%)	910 (7%)
3	418 (6%)	334 (2%)	1178 (2%)
4	366 (3%)	333 (4%)	930 (3%)
5	465 (3%)	612 (2%)	1157 (7%)

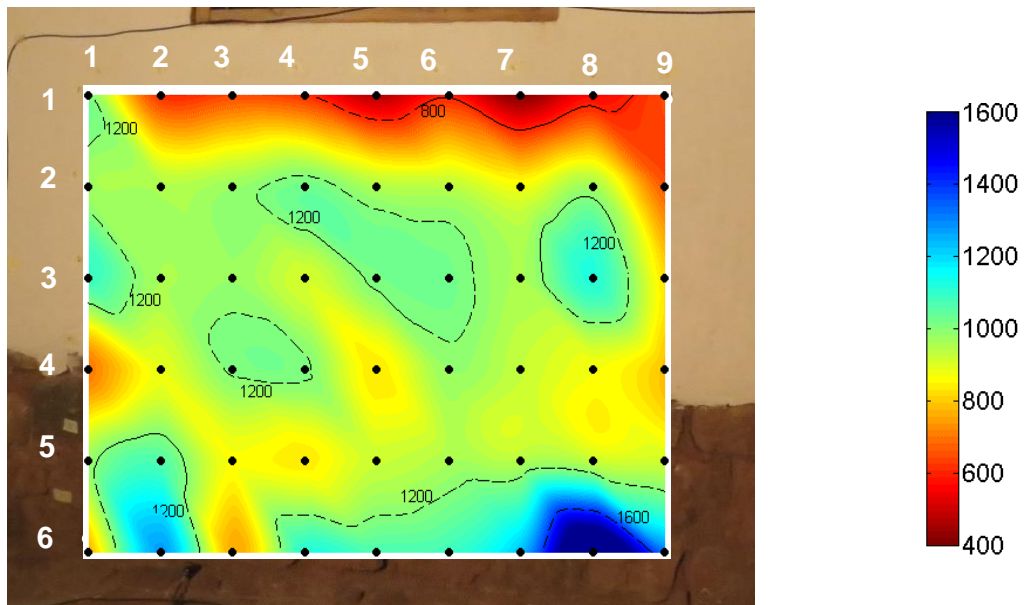
Tabla 6.4. Velocidades en muro de capilla en m/s (CV)

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1014 (3%)	616 (3%)	645 (5%)	613 (3%)	471 (1%)	593 (4%)	416 (4%)	566 (4%)	648 (9%)
2	968 (4%)	953 (6%)	978 (3%)	1028 (6%)	951 (5%)	939 (4%)	872 (5%)	967 (2%)	661 (7%)
3	1090 (3%)	962 (4%)	980 (7%)	910 (6%)	1014 (5%)	1023 (3%)	960 (3%)	1117 (2%)	817 (7%)
4	700 (2%)	884 (4%)	1007 (4%)	1008 (3%)	837 (3%)	983 (4%)	927 (2%)	871 (3%)	782 (3%)
5	972 (4%)	1062 (7%)	865 (3%)	841 (5%)	921 (5%)	960 (2%)	949 (4%)	927 (5%)	912 (7%)
6	753 (5%)	1273 (7%)	760 (4%)	1114 (2%)	1072 (7%)	1088 (3%)	1235 (6%)	1837 (4%)	1319 (4%)

Con estos datos se construyeron las siguientes imágenes en 2D correspondientes a cada sub-elemento estructural. En la Figura 6.5a se presenta los resultados del contrafuerte y en la Figura 6.5b del muro en la capilla.



(a)



(b)

Figura 6.5 Tomografías de las caras laterales de un sector de la Iglesia de Andahuaylillas (a) contrafuerte (b) muro de una capilla.

En la Figura 6.5a se observa velocidades más altas en la parte derecha. Esta área corresponde a la cara externa del contrafuerte la cual está constituida netamente en piedra. En esta área velocidades entre 900 y 1200 m/s fueron calculadas. En cambio en la parte izquierda velocidades bajas entre 300 y 450 m/s son predominantes. A pesar de que se observa en la Figura 6.4a que están constituidas externamente en piedra, se puede decir que en el interior están compuestas por otro material de relleno el cual disminuye las velocidades en más de un 50%.

El en muro de la capilla se puede ver que casi todas las velocidades se encuentran entre 900 y 1100 m/s. Estas velocidades eran las esperadas entre las filas 4 y 6 (Ver Figura 6.4b) debido a que están ubicadas en el sobre-cimiento de la capilla y deben tener velocidades similares a la cara externa del contrafuerte. En cambio se extienden hasta las filas 2 y 3 que corresponde al muro de adobe. En la parte superior se observa un cambio brusco de velocidades entre 400 y 650 m/s. Esto posiblemente puede indicar la presencia de daño en esa zona del muro o puede ser un cambio de material ya que abarca casi toda la fila 1. Lamentablemente la malla solo fue dibujada hasta esa zona y no se tomaron más puntos en la parte superior.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajos futuros

7.1 Conclusiones

La presente tesis describe la aplicación de ensayos sónicos y ultrasónicos como herramientas para la conservación de monumentos históricos. El trabajo consistió en la ejecución de ensayos en laboratorio en diversos materiales y en muros de prueba como métodos de calibración de estos ensayos. Finalmente se aplicaron metodologías para el estudio de los materiales y subelementos estructurales de Huaca de la Luna y la aplicación de ensayos sónicos en la Iglesia de Andahuaylillas. Se presentan las conclusiones más importantes en base a los resultados encontrados.

7.1.1 Ensayos en materiales y muros de prueba

La velocidad de propagación de la ondas P fueron medidas y calculadas utilizando ensayos sónicos y ultrasónicos directos en diferentes materiales. Se obtuvieron rangos de velocidades de muestras no dañadas de concreto, ladrillo, cantería, adobe y piedra los cuales sirven como base para la evaluación futura de estructuras compuestas por estos materiales.

Una nueva metodología para el cálculo de la velocidad de onda P de estas muestras fue propuesta. Se obtuvieron velocidades menores pero congruentes de acuerdo a las otras metodologías estudiadas.

7.1.2 Ensayos en materiales y muros de prueba

Se construyeron tomografías sónicas y ultrasónicas de dos muros en los que se colocaron defectos internos. Las imágenes creadas permitieron ubicar satisfactoriamente estas irregularidades. Se observó que con una malla más densa se obtienen mejores resultados.

Las tomografías ultrasónicas fueron las que tuvieron mayor exactitud para identificar los defectos. Sin embargo estas están limitadas a las dimensiones del objeto en estudio debido a la atenuación de las ondas.

7.1.3 Ensayos sónicos, Impacto eco y de ultrasonido para estudiar el material y subelementos estructurales en Huaca de la Luna

Se logró realizar la caracterización mecánica de unidades de adobe de un sector del complejo arqueológico Huaca de la Luna con el uso complementario de técnicas innovadoras de carácter no-destructivo. Se desarrollaron satisfactoriamente ensayos de ultrasonido que permitieron caracterizar cuantitativamente el comportamiento dinámico y que sirvieron también para un análisis cualitativo de homogeneidad de las unidades de adobe.

Los resultados del módulo de elasticidad dinámico obtenidos a través del ensayo de ultrasonido presenta un valor promedio de 2900 MPa, además el módulo de Poisson calculado fue de 0.16. Se evidencia una pequeña variabilidad de estos ensayos de alrededor de 10% lo cual indica la confiabilidad y repetitividad del método y abre las puertas para futuras aplicaciones incluso para verificación in-situ.

Las tomografías de las columnas ayudaron a identificar zonas vulnerables en ellas. Se pueden ver que las velocidades son mucho menores a las calculadas en las unidades de

adobe. Esto puede ser debido a un mal acoplamiento entre el adobe y mortero o a la presencia de daño al interior de las columnas.

El análisis de impacto eco permitió determinar la distribución de los adobes en las columnas de Huaca de la Luna. En este estudio se consideraron dimensiones representativas para las unidades de adobe y una velocidad de 1350 m/s la cual representa al 65% de las unidades de adobe. Estos parámetros se obtuvieron previamente en el estudio del material de la Huaca.

7.1.4 Ensayos sónicos en sub-elementos estructurales de la iglesia de Andahuaylillas.

Se logró aplicar ensayos sónicos satisfactoriamente en algunos de los materiales que conforman la estructura de la Iglesia de Andahuaylillas. Se obtuvo un rango de velocidades en piedras lo cual indica la existencia de varias tipologías pétreas que constituyen a la estructura del sobre-cimiento.

Se pudo obtener imágenes tomográficas de algunos sub-elementos estructurales tales como un contrafuerte y un sector de uno de los muros de una de las capillas. Estas imágenes indicaron que posiblemente los contrafuertes tienen un material relleno diferente a la piedra. Además se observó que el muro de la capilla se encuentra en buen estado debido a las velocidades elevadas que se encontraron en la mayoría de los puntos evaluados.

7.2 Trabajos Futuros

En el estudio de la propagación de ondas de un material el impacto que las genera influye en los resultados obtenidos. Por ello se debe realizar una investigación que ayude a minimizar estos efectos.

Así como se estudió el adobe de Huaca de la Luna, existen otros materiales como la piedra y la cantería que están presentes masivamente en otras estructuras patrimoniales como iglesias o centros prehispánicos. Se debe realizar una caracterización mecánica de estos materiales.

Otro de los campos a profundizar debe ser la construcción de tomografías utilizando ensayos sónicos o ultrasónicos indirectos. Con esta metodología es posible obtener imágenes de la sección del elemento en estudio y es posible tener una mejor idea de su estructura interna.

Referencias

ASTM C38. (2014). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete.

ASTM C39. (2015). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

ASTM C566. (2013). Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying.

ASTM C597. (2009). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concret.

ASTM D2216. (2010). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.

ASTM D2845. (2008). Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock.

ASTM D422. (2014). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.

ASTM D4643. (2008). Standard test method for determination of water (moisture) content of soil by microwave oven heating.

ASTM D7012. (2014). Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures.

ASTM D7263. (2009). Standard test method for laboratory determination of density.

Binda, L., Saisi, A., & Zanzi, L. (2003a). Sonic tomography and flat-jack test as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolo l'Arena (Italy). *NDT&E International*, 215-227.

Binda, L., Saisi, A., Tiraboschi, C., Valle, S., Colla, C., & Forde, M. (2003b). Application of sonic and radar tests on the piers and walls of the Cathedral of Noto. *Construction and Building Materials.*, 613-627.

Cappabianca, C., Luprano, V., & Tatí, A. (2008). Diagnostic sonic investigation on San Giovanni in Laterano obelisk, Rome, Italy and tomographic reconstruction of same slides. Jerusalem, Israel: In: 9th International Conference on NDT of Art.

- Carino, N. J. (2001). The Impact-Echo Method: An Overview. *In Structures 2001: A Structural Engineering Odyssey* (pág. 18). Washington D.C: American Society of Civil Engineers.
- Casarin, F., Valluzi, M., da Porto, F., & Modena, C. (2013). Evaluation of the structural behaviour of historic masonry buildings by a sonic pulse velocity method. *Heritage Masonry: Materials and Structures*(13), 13-23.
- Colla, C., Grüner, B., Fiedler, K., Gabrielli, E., Fernandez, A. J., Gentilini, C., . . . Rajcic, V. (2010). *Smart Monitoring of Historic Structures. D5.1-part 1*. Report on test methods and former test results.
- Cooley, J., & Tukey, J. (1965). An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series . *Mathematics of Computation*, 19(90), 298-301.
- D422, A. (2014). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
- Delgado, M., & Guerrero, I. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and building materials*, 21(2), 237-251.
- Domus. (2014). *allshookup.org*. Recuperado el Abril de 2014, de <http://allshookup.org/quakes/wavetype.htm>
- Granja, J. (2011). *Experimental evaluation of the elastic modulus of cementitious materials at early ages*. University of Minho: MSc Thesis.
- ICOMOS/ISCARSAH Committee. (2005). *Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*.
- Ingle, V., & Proakis, J. (2012). *Digital Signal Processing Using MATLAB*. Stamford, USA: CENGAGE Learning.
- Krautkramer, H., & Krautkramer, J. (1990). *Ultrasonic testing of materials*. Berlin: Springer Verlag.
- Leong, E.-C., Yeo, S.-H., & Rahardjo, H. (2004). Measurement of wave velocities and attenuation using an ultrasonic test system. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5), 844-860.
- Liang, R., Hota, G., Lei, Y., Li, Y., Stanislawski, D., & Jiang, Y. (2013). Nondestructive Evaluation of Historic Hakka Rammed. *Sustainability*, 5, 298-315.
- Liberatore, D., Spera, G., Mucciarelli, M., Gallipoli, M., Santarsiero, D., Tancredi, C., . . . Tedeschi, C. (2006). Typological and Experimental Investigation on the Adobe Buildings of Aliano (Basilicata, Italy). New Delhi, India: In: SAHC'2006, Structural Analysis of Historical Construction.

- Lombillo, I., Thomas, C., Villegas, L., Fernandez, J., & Norambuena, J. (2013). Mechanical characterization of rubble stone masonry walls using non and minor destructive tests. *Construction and Building Materials*, 266-277.
- McCann, D. M., & Forde, M. (2001). Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT&E International*, 34(2), 71-84.
- Miranda, L., Cantini, L., Guedes, J., Binda, L., & Costa, A. (2013). Application of sonic test to masonry elements: Influence of joints on the propagation velocity of elastic waves. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 667-682.
- Naik, T. R., Malhotra, V. M., & Popovics, J. S. (2003). The Ultrasonic Pulse Velocity Method. En *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete* (págs. 8-1 a 8-19). CRC press.
- ONSITEFORMASONRY. (2004). *Deliverable D11.1-Technical guidelines for an appropriate use of suggested equipment*. Project n° EVK4-2001-00091, Contract n° EVK4-CT-2001-00060.
- Perez, A. (1993). Ensayos y experiencias de alteración en la conservación de obras de piedra de interés histórico-artístico. *Conservación del Patrimonio Arquitectónico*(13), 53-57.
- Proceq. (2012). PunditLink V2.4.
- Proyecto Arqueológico Huaca de la Luna. (2008). *Informe técnico*. Universidad Nacional de Trujillo: Facultad de Ciencias Sociales.
- Proyecto arqueológico Huaca de la Luna. (2010). *Informe técnico*. Universidad Nacional de Trujillo: Facultad de Ciencias Sociales.
- Retamozo, S., Arce, D., Aguilar, R., Zvietcovich, F., Quintana, M., & Castañeda, B. (2015). A comparison of digital modelling techniques analyzing a section of Qhapaqñan. In 2015 Digital Heritage. *IEEE*, 1, 147-150.
- Sansalone, M. J., & Streett, W. B. (1997). *Impact-echo: nondestructive evaluation of concrete and masonry*. Ithaca (NY): Bullbrier Press.
- Sansalone, M., Carino, J., & Hsu, N. (1987). A Finite Element Study of Transient Wave Propagation in Plates. *Research of the National Bureau of Standards*, 92(4), 267-278.
- Santamarina, J., Klein, A., & Fam, M. (2001). Soils and waves: Particulate materials behavior, characterization and process monitoring. *Journal of Soils and Sediments*, 1(2), 130.

Sauer, T. (2012). Trigonometric Interpolation and the FFT. En T. Sauer, *Numerical Analysis* (págs. 467-494). PEARSON.

Uceda, S., & Paredes, A. (1994). Arquitectura y función de la Huaca de la Luna. *Revista Cultural des Indes*(7), 42-46.

Valluzzi, M., Mazzon, N., Munari, M., Casarin, F., & Modena, C. (2009). Effectiveness of injections evaluated by sonic tests on reduced scale multi-leaf masonry building subjected to seismic actions. Nantes, France: In: NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering.

Vasconcelos, G. (2005). *Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls* (PhD. Thesis ed.). Portugal: University of Minho.

Vasconcelos, G. (2005). NDT – Correlations with physical and Mechanical properties of granites. En *Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: Characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls* (págs. 105-124). Universidade do Minho: Tesis.

Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., & Fahey, M. (2009). A Framework Interpretig Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods. *Geotechnical Testing Journal*, 1-17.

Welch, P. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, 15(2), 70-73.

Anexos

7.3 Anexos del Capítulo 4

Tabla A. 1 Longitudes entre los puntos de ensayo del muro 2 (mm)

Material	Concreto				Ladrillo				Piedra				Cantería				Adobe			
	N°	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
1	652	650	648	647	645	645	645	645	620	615	610	610	614	615	615	617	611	612	612	613
2	650	649	648	647	644	645	645	646	611	615	612	616	618	618	618	618	613	613	613	615
3	648	648	647	646	643	644	644	642	617	610	618	611	617	616	616	615	614	612	612	610
4	647	647	646	646	643	644	644	646	613	619	616	615	618	615	615	618	613	612	612	612
5	646	646	645	645	643	642	642	644	617	616	616	619	614	616	616	613	618	616	616	614
6	645	645	645	645	646	645	645	646	609	631	621	615	611	613	613	611	616	614	614	615
7	645	645	645	645	645	645	645	645	616	650	615	607	615	617	617	617	615	614	614	612
8	645	645	645	645	647	645	645	645	607	623	608	623	618	614	614	615	614	615	615	617
9	645	645	645	645	645	645	645	644	622	605	621	615	619	617	617	614	616	616	616	617
10	645	645	645	645	648	647	647	646	613	611	619	613	617	620	620	618	616	615	615	617
11	645	645	645	645	644	643	643	642	618	613	616	618	618	616	616	615	615	618	618	614

Tabla A. 2 Velocidades de los puntos evaluados en el muro 1 aplicando ensayos sónicos (m/s)

Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	5233	4679	4791	4114	4510	4983	5074	4789	4000	4618	4250	4094	4881	4472	4118
2	5858	4196	4304	3445	3227	2941	3781	2488	3102	3639	2671	2486	3316	3301	3906
3	3898	4474	3918	2819	1942	2169	2153	2554	2411	2423	2544	2589	2335	3018	3968
4	5063	3924	4539	3318	3384	3028	3805	3190	3570	3408	3526	3388	3557	3807	4304
5	4521	5177	4368	3291	3439	2887	3819	3721	3315	2989	2847	2623	3270	3708	3344
6	4161	4285	3795	2792	2231	2247	2220	2428	2328	2326	2451	2312	2274	2643	4185
7	5548	4526	3378	3217	3136	3012	2826	3054	3241	2360	2775	2421	2658	2852	3578
8	4433	4283	3548	3295	3352	3748	3439	3512	3880	3427	3465	3547	3980	3556	4101
9	4471	4007	4108	4095	3986	3594	4555	3813	4440	4340	4230	3959	4095	4047	3888
10	4474	4130	3729	4283	3961	3876	3998	3501	3712	3916	3986	3959	3812	3955	3596
11	4573	4510	3712	4279	4316	3605	3853	3215	3426	2632	2673	3173	3295	3388	3463
12	5430	4866	4481	5760	4757	4731	4462	3997	3979	4337	3974	4659	4832	4312	4753
13	5145	4746	4519	4459	4286	4005	3954	4305	4592	3837	3975	4074	4263	3578	3916
14	4907	4444	4634	3286	3522	2928	3620	3330	3403	3626	3313	3148	3618	2992	3690
15	5714	5008	4356	4019	4167	4363	4117	4350	4575	4110	4909	4135	4353	4790	4452

Tabla A. 3 Velocidades de los puntos evaluados en el muro 1 aplicando ensayos de ultrasonido (m/s)

Punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	4971	4942	4877	4849	4791	4748	4766	4791	4755	4746	4748	4818	4809	4681	4782
2	4739	4804	4819	4765	4748	4755	4666	4653	4707	4716	4526	4661	4656	4590	4737
3	4390	4469	4560	4826	4773	4693	4658	4551	4427	4393	4437	4495	4460	4416	4696
4	4360	3994	4574	4877	4753	4649	4599	4582	4322	3913	4207	4268	3946	4311	4701
5	4536	4191	4660	4829	4755	4588	4579	4599	4321	4018	4276	4182	3883	4286	4660
6	4620	4205	4785	4828	4649	4719	4582	4589	4309	3919	4117	4214	4057	4221	4632
7	4673	4106	4765	4913	4549	4693	4728	4590	4247	3906	4206	4237	4002	4168	4570
8	4699	4093	4694	4830	4546	4641	4615	4508	4319	3720	4207	4238	4107	4207	4680
9	4742	4226	4551	4729	4452	4632	4634	4590	4334	3919	4207	4258	3979	4096	4590
10	4775	4323	4550	4720	4402	4712	4764	4589	4319	3924	4303	4395	4104	4124	4474
11	4619	4262	4691	4776	4503	4649	4728	4668	4378	4080	4319	4443	4131	4028	4614
12	4667	4194	4646	4794	4407	4598	4684	4600	4407	4006	4220	4267	4057	4126	4615
13	4587	4127	4576	4756	4438	4604	4725	4680	4435	3971	4199	4387	4098	4145	4631
14	4565	3967	4602	4713	4476	4741	4700	4685	4487	4224	4318	4448	4445	4308	4661
15	4424	4272	4453	4481	4381	4625	4592	4649	4498	4412	4511	4538	4615	4508	4658

Tabla A. 4 Velocidades en el área de concreto (m/s) – muro 2

N°	1	2	3	4
1	4765 (3%)	4405 (3%)	4360 (3%)	4535 (3%)
2	4798 (4%)	4379 (3%)	4541 (3%)	4661 (2%)
3	5017 (3%)	4426 (7%)	4646 (1%)	4696 (1%)
4	4962 (5%)	4408 (1%)	4500 (1%)	4845 (2%)
5	4466 (2%)	4592 (1%)	4691 (1%)	4873 (3%)
6	4683 (3%)	4580 (2%)	4725 (1%)	4870 (2%)
7	4565 (2%)	4674 (1%)	4807 (1%)	5668 (1%)
8	4637 (2%)	4783 (1%)	4841 (2%)	4890 (1%)
9	5130 (6%)	4622 (1%)	4574 (1%)	4882 (2%)
10	4646 (2%)	4612 (1%)	4678 (1%)	4940 (1%)
11	4731 (4%)	4521 (5%)	4879 (1%)	4990 (1%)

Tabla A. 5 Velocidades en el área de albañilería (m/s) – muro 2

N°	1	2	3	4
1	2381 (2%)	2381 (4%)	2323 (2%)	2355 (3%)
2	2241 (5%)	2440 (4%)	2132 (1%)	2027 (5%)
3	2606 (3%)	2484 (3%)	2366 (2%)	2489 (4%)
4	2620 (2%)	2812 (3%)	2736 (1%)	2651 (4%)
5	2868 (4%)	2583 (3%)	2668 (2%)	2610 (3%)
6	2896 (4%)	2712 (3%)	2818 (1%)	2736 (3%)
7	3607 (7%)	3037 (2%)	3218 (2%)	3677 (2%)
8	3078 (6%)	2882 (4%)	3116 (2%)	2630 (3%)
9	2573 (2%)	2772 (4%)	2834 (5%)	2779 (4%)
10	2497 (3%)	2766 (2%)	2828 (3%)	2614 (3%)
11	2979 (4%)	2965 (4%)	2769 (4%)	2509 (3%)

Tabla A. 6 Velocidades en el área de piedra (m/s) – muro 2

N°	1	2	3	4
1	5274 (2%)	4420 (2%)	3933 (3%)	3623 (2%)
2	4409 (5%)	3711 (9%)	4096 (6%)	4129 (3%)
3	3914 (2%)	3471 (5%)	3521 (3%)	4735 (5%)
4	4632 (4%)	4574 (2%)	4510 (2%)	4391 (2%)
5	5199 (6%)	4608 (7%)	3512 (5%)	3797 (4%)
6	4421 (5%)	4352 (2%)	3374 (2%)	3533 (1%)
7	5304 (2%)	4644 (3%)	4038 (5%)	3586 (3%)
8	4249 (4%)	5186 (7%)	4513 (4%)	4484 (4%)
9	5308 (2%)	4547 (1%)	3638 (5%)	4443 (4%)
10	3883 (1%)	4544 (6%)	5235 (4%)	4935 (4%)
11	4406 (4%)	4609 (1%)	5062 (2%)	5179 (5%)

Tabla A. 7 Velocidades en el área de cantería (m/s) – muro 2

N°	1	2	3	4
1	1515 (4%)	1628 (3%)	1654 (2%)	1255 (1%)
2	1730 (2%)	1324 (2%)	1343 (3%)	1591 (3%)
3	1530 (3%)	1762 (2%)	1612 (3%)	1642 (2%)
4	1649 (2%)	1801 (3%)	1792 (2%)	1623 (2%)
5	1708 (3%)	1475 (3%)	1456 (3%)	1692 (2%)
6	1694 (2%)	1557 (2%)	1648 (2%)	1777 (3%)
7	1712 (3%)	1896 (3%)	1905 (3%)	1585 (4%)
8	1947 (3%)	1710 (5%)	1739 (3%)	1673 (3%)
9	1751 (2%)	1853 (3%)	1952 (4%)	1646 (2%)
10	1957 (6%)	1750 (2%)	1772 (4%)	1632 (2%)
11	1855 (2%)	1609 (3%)	1670 (1%)	1790 (2%)

Tabla A. 8 Velocidades en el área de adobe (m/s) – muro 2

N°	1	2	3	4
1	929 (2%)	913 (2%)	950 (1%)	1110 (2%)
2	954 (3%)	991 (1%)	1038 (2%)	1175 (2%)
3	890 (2%)	926 (2%)	994 (1%)	1082 (2%)
4	866 (1%)	829 (3%)	861 (4%)	1145 (3%)
5	899 (2%)	911 (3%)	954 (2%)	1181 (3%)
6	862 (1%)	829 (3%)	852 (2%)	1091 (2%)
7	905 (2%)	1126 (3%)	1151 (2%)	1088 (2%)
8	957 (3%)	1104 (5%)	1158 (5%)	1081 (1%)
9	828 (1%)	1083 (3%)	1106 (4%)	1059 (2%)
10	828 (4%)	759 (5%)	826 (3%)	987 (3%)
11	868 (2%)	786 (2%)	773 (3%)	1058 (2%)

Tabla A. 9 Velocidades ultrasónicas en el área de concreto (m/s) – muro2

N°	1	2	3	4
1	4382 (0.2%)	4391 (0.5%)	4395 (0.1%)	4466 (0.4%)
2	4347 (0.1%)	4369 (0.2%)	4343 (0.5%)	4428 (0.3%)
3	4331 (0.2%)	4349 (0.1%)	4376 (0.1%)	4550 (0.1%)
4	4266 (0.2%)	4224 (0.4%)	4301 (0.2%)	4558 (0.2%)
5	4329 (0.3%)	4189 (0.3%)	4364 (0.6%)	4656 (0.1%)
6	4350 (0.2%)	4337 (0.6%)	4436 (0.5%)	4667 (0.5%)
7	4443 (0.2%)	4329 (0.9%)	4483 (0.1%)	4616 (0.2%)
8	4411 (0.1%)	4421 (0.3%)	4453 (0.2%)	4585 (0.4%)
9	4401 (0.1%)	4345 (0.4%)	4308 (0.3%)	4565 (0.1%)
10	4398 (0.3%)	4402 (0.1%)	4405 (0.2%)	4616 (0.2%)
11	4467 (0.1%)	4393 (0.3%)	4573 (0.2%)	4675 (0.3%)

Tabla A. 10 Velocidades ultrasónicas en el área de ladrillo (m/s) – muro2

N°	1	2	3	4
1	1306 (0.1%)	1443 (2.7%)	1701 (3.5%)	1419 (3.7%)
2	1495 (7.6%)	1245 (1.8%)	1193 (1.4%)	1539 (0.2%)
3	1359 (1.0%)	1671 (0.6%)	1290 (2.5%)	1730 (4.4%)
4	2028 (0.9%)	1519 (0.5%)	1601 (0.8%)	1713 (6.9%)
5	1612 (5.3%)	1140 (0.6%)	1389 (1.7%)	1677 (2.5%)
6	1392 (6.3%)	1242 (0.9%)	1377 (1.2%)	1493 (3.8%)
7	1839 (3.0%)	1612 (0.7%)	2075 (1.1%)	1472 (1.2%)
8	1763 (7.3%)	1746 (1.0%)	1493 (6.4%)	1754 (1.9%)
9	1453 (1.6%)	1477 (0.4%)	1840 (7.7%)	1393 (2.2%)
10	1874 (5.7%)	1299 (0.7%)	1311 (2.2%)	1599 (7.0%)
11	1691 (4.9%)	1875 (1.7%)	1440 (0.2%)	924 (1.0%)

7.4 Anexos del Capítulo 5

Tabla A. 11. Velocidades columna C-1 (m/s)

Lado 1					Lado 2			
N°	A	B	C	D	A	B	C	D
1	982 (4%)	1261 (1%)	1217 (2%)	1155 (2%)	860 (1%)	1204 (4%)	1104 (5%)	1134 (7%)
2	756 (5%)	831 (1%)	892 (3%)	1362 (4%)	1088 (3%)	1724 (5%)	1324 (5%)	1541 (4%)
3	1165 (5%)	847 (5%)	2155 (6%)	1108 (2%)	1274 (5%)	1680 (6%)	1362 (3%)	1361 (6%)
4	998 (4%)	1241 (1%)	1157 (1%)	1091 (1%)	1220 (7%)	1861 (6%)	1528 (4%)	1365 (8%)
5	1040 (4%)	1283 (3%)	1360 (4%)	1100 (2%)	1397 (4%)	1579 (1%)	1972 (2%)	1284 (4%)
6	1456 (2%)	1842 (3%)	1219 (4%)	1482 (5%)	2172 (4%)	2082 (6%)	2162 (6%)	1815 (1%)

Tabla A. 12 Velocidades columna C-2 (m/s)

Lado 2				
N°	A	B	C	D
1	1023 (3%)	907 (6%)	964 (8%)	980 (15%)
2	780 (7%)	1079 (8%)	1514 (7%)	1362 (8%)
3	787 (4%)	1162 (3%)	2001 (6%)	965 (6%)
4	705 (5%)	1728 (9%)	1145 (6%)	1439 (5%)
5	1217 (3%)	1017 (2%)	1429 (7%)	2433 (3%)
6	1307 (2%)	2086 (6%)	1359 (5%)	1667 (3%)

Tabla A. 13 Velocidades columna C-3 (m/s)

Lado 1				
N°	A	B	C	D
1	988 (5%)	1219 (4%)	2243 (5%)	1474 (5%)
2	1154 (1%)	1495 (4%)	2761 (5%)	769 (2%)
3	923 (1%)	1814 (3%)	1297 (4%)	948 (5%)
4	1282 (5%)	850 (4%)	1322 (4%)	567 (4%)
5	977 (6%)	1139 (4%)	1449 (6%)	600 (2%)
6	942 (4%)	1397 (5%)	1249 (4%)	1283 (6%)

Tabla A. 14 Velocidades columna C-4 (m/s)

Lado 1					Lado 2			
N°	A	B	C	D	A	B	C	D
1	1337 (1%)	2104 (7%)	1798 (4%)	1247 (6%)	1791 (6%)	2420 (3%)	2336 (4%)	1593 (3%)
2	960 (5%)	1169 (5%)	1402 (2%)	679 (9%)	1477 (6%)	1838 (2%)	2155 (5%)	1457 (2%)
3	1083 (6%)	1377 (3%)	1534 (5%)	1963 (7%)	1340 (4%)	1828 (2%)	2018 (1%)	1379 (8%)
4	1272 (4%)	1089 (2%)	1071 (4%)	1070 (7%)	1716 (4%)	2087 (8%)	1730 (2%)	1574 (2%)
5	1057 (5%)	1764 (1%)	1353 (7%)	1076 (7%)	1495 (6%)	2239 (4%)	2298 (7%)	1153 (6%)
6	1092 (2%)	1274 (3%)	1665 (1%)	990 (1%)	1454 (3%)	1928 (4%)	1915 (4%)	1197 (3%)

Tabla A. 15 Velocidades columna C-5 (m/s)

Lado 1					Lado 2			
N°	A	B	C	D	A	B	C	D
1	1228 (4%)	1271 (3%)	1835 (1%)	1093 (3%)	2666 (5%)	1684 (6%)	2079 (1%)	1966 (5%)
2	1651 (3%)	1590 (1%)	1409 (6%)	1499 (7%)	1570 (3%)	2253 (4%)	1989 (4%)	1809 (5%)
3	1122 (5%)	2377 (2%)	1205 (5%)	1174 (4%)	1230 (2%)	1131 (4%)	1788 (3%)	1071 (5%)
4	930 (2%)	1849 (6%)	1034 (4%)	744 (1%)	1195 (4%)	1595 (6%)	1664 (4%)	1221 (6%)
5	1200 (5%)	1719 (5%)	1468 (4%)	1829 (4%)	1495 (3%)	2354 (6%)	3102 (4%)	1631 (4%)
6	1178 (3%)	1915 (6%)	1392 (3%)	1025 (5%)	617 (4%)	1066 (4%)	1903 (3%)	1170 (5%)