

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



**Metodología para la detección de vacíos en muros de concreto
armado por medio del pulso ultrasónico**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN
INGENIERÍA CIVIL**

AUTOR

Leonel Lipa Cusi

ASESOR:

Laura Marina Navarro Alvarado

COASESOR:

Enrique N. Pasquel Carbajal

Abril, 2018

RESUMEN

En la industria de la construcción existen procesos constructivos deficientes que conducen a problemas en la calidad del concreto que pueden afectar la capacidad de una estructura. Un problema usual producto de estas prácticas suelen ser las cangrejeras o vacíos superficiales. Estas en ocasiones son de gran magnitud que pueden abarcar el núcleo del concreto y causar una disminución considerable de las propiedades de los elementos. Estos vacíos internos no se aprecian a simple vista por lo que una manera rudimentaria de localizarlos es por medio de extracciones de núcleos de concreto. Otra manera de detectarlos es usando ensayos no destructivos como por ejemplo, el uso de ondas pulso eco ultrasónicas. En esta investigación se desarrolla una metodología para ubicar vacíos internos con ondas pulso eco ultrasónicas en especímenes de concreto de espesores típicos de edificaciones. Para este propósito se elaboraron muros de concreto armado los cuales contienen en su interior esferas de poliestireno expandido de 50 mm de diámetros que representan los vacíos internos. Estas esferas fueron colocadas entre diferentes espaciamientos de barras de acero con el fin de ver si es posible detectarlas. También se desarrolla un programa en Matlab que filtra la imagen de ultrasonido con la señal del detector de metales, y así obtener una nueva imagen libre de interferencia de barras de acero. De esta investigación se concluye que cuando se realicen escaneos en concreto armado, es necesario el uso de un equipo de detector de metales ya que las barras de acero aparecen en la imagen de ultrasonido como manchas. Si las barras de acero son de mayor diámetro, las manchas tienen una mayor probabilidad de aparecer. Por otra parte, las esferas fueron detectadas con una probabilidad de 81.94 %, cuando estas se ubican entre aceros separados una distancia mayor a 100 mm.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de tesis es un esfuerzo en el cual participaron directa o indirectamente diferentes personas. Entre estas personas se encuentran mis padres, Leonidas y Norma, quienes siempre me han apoyado en lograr mis objetivos; y mis hermanos, Ronald, Edison y Estefany, quienes serán muy buenos futuros profesionales. A mi asesora, la Ing. Laura Navarro, por todo el gran apoyo brindado en cada fase de esta investigación que con paciencia y alto profesionalismo condujo la elaboración del presente trabajo de tesis. A mi coasesor, el Ing. Enrique Pasquel, por el asesoramiento de la tesis y las excelentes ideas que aportó a esta investigación. A mis amigos del Laboratorio de Estructuras de la PUCP y becados Concytec, ya que sin ellos, este logro jamás hubiera sido completado.

También, agradecer al Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) por el financiamiento de todos los ensayos de esta investigación; al programa de investigación CONCYTEC 2016/17 (el cual es financiado por FONDECYT N° 232-2015) por la beca de estudios de maestría en la PUCP, como también, por los materiales y mano de obra del proyecto; y por último, a la empresa SIKA por los aditivos necesarios para la elaboración de los especímenes de concreto.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVOS.....	4
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	4
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3. ALCANCES	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EL CONCRETO.....	5
2.2. ONDAS SONORAS.....	6
2.3. IMPEDANCIA ACÚSTICA.....	7
2.4. REFLEXIÓN DE ONDAS MECÁNICAS.....	8
2.5. EQUIPOS DE ULTRASONIDO Y DE DETECCIÓN DE METALES UTILIZADOS EN EL CONCRETO	10
2.5.1. EQUIPOS DE ULTRASONIDO PARA CONCRETO.....	10
2.5.2. CARACTERÍSTICAS DE UN EQUIPO PULSO ECO ULTRASÓNICO	11
2.5.3. DETECTOR DE BARRAS DE ACERO PARA CONCRETO	26
CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN.....	30
3.1. MATERIALES PARA EL DESARROLLO DE LOS ENSAYOS	30
3.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS INSUMOS DEL CONCRETO	30
3.1.2. EQUIPOS UTILIZADOS.....	30
3.2. ETAPA 1: ENSAYOS PRELIMINARES	31
3.2.1. PLANIFICACIÓN.....	31
3.2.2. ENSAYOS DE CONTROL	32
3.3. ETAPA 2: ELABORACIÓN DE MUROS DE CONCRETO	34
3.3.1. ELEMENTOS ELABORADOS	34
3.3.2. PROCEDIMIENTO DE ESCANEEO	38
CAPÍTULO 4: RESULTADOS OBTENIDOS	41
4.1. ENSAYOS EN CONCRETO FRESCO Y ENDURECIDO	41
4.2. RESULTADOS DE LAS IMÁGENES PULSO ECO (ONDAS S).....	42
4.2.1. INFLUENCIA DEL ACERO TRANSVERSAL	42
4.2.2. INFLUENCIA DEL ACERO LONGITUDINAL	46
4.2.3. ESFERAS ENCONTRADAS	50

CAPÍTULO 5: PROCESAMIENTO DE SEÑALES PARA ELIMINAR EL ACERO TRANSVERSAL DE LAS IMÁGENES DE ULTRASONIDO.....	54
5.1. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL DEL DETECTOR DE METALES ...	54
5.2. PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN DEL PULSO ECO ULTRASÓNICO	56
5.3. FILTRADO DE LA IMAGEN DE ULTRASONIDO	58
5.4. INTERFAZ DEL PROGRAMA	63
5.5. APLICACIÓN DEL PROGRAMA EN OBRA	64
5.5.1. PUENTE EN CAJAMARCA.....	64
5.5.2. CISTERNA – TACNA	66
CAPÍTULO 6: METODOLOGÍA Y CONCLUSIONES.....	69
6.1. METODOLOGÍA	69
6.2. CONCLUSIONES	71
6.3. PROYECCIONES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	73
REFERENCIAS.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ejemplo de un escaneo con un equipo de ultrasonido	3
Figura 2: Ondas mecánicas (a) Ondas P (b) Ondas S	6
Figura 3: Método directo - Equipo de ultrasonido tradicional	10
Figura 4: Método pulso eco - Equipo de pulso eco ultrasónico	11
Figura 5: Equipo pulso eco ultrasónico	13
Figura 6: Calculo de la velocidad de la onda “S”	13
Figura 7: Calculo de la velocidad de la onda superficial.....	14
Figura 8: Técnica de apertura sintética de enfoque (SAFT).....	15
Figura 9: Escaneo parcial.....	16
Figura 10: Escaneo parcial.....	16
Figura 11: Franja escaneada.....	17
Figura 12: Escaneos parciales	18
Figura 13: Compensación horizontal.....	19
Figura 14: Reconstrucción de la imagen de ultrasonido.....	19
Figura 15: Reconstrucción de la imagen de ultrasonido.....	20
Figura 16: Ajuste de la coloración	21
Figura 17: Detalles de una imagen de ultrasonido	22

Figura 18: Modos de obtención de discontinuidades	23
Figura 19: Ubicación horizontal de discontinuidad	24
Figura 20: Ecos de discontinuidad	26
Figura 21: Función de un detector de metales.	27
Figura 22: Cobertura de un detector de metales	28
Figura 23: Escaneo en franja con un detector de metales	29
Figura 24: Equipo de pulso eco (Ondas S)	30
Figura 25: Equipo de detector de barras de acero	31
Figura 26: Muros de prueba elaborados (medidas en mm).....	33
Figura 27: Muros de prueba a) M1P b) M2P c) M3P	33
Figura 28: Modelo 1 (T1), muros de concreto armado	35
Figura 29: Modelo 2 (T2), muros de concreto armado	35
Figura 30: Modelo 3 (T3), muros de concreto armado (bloque patrón)	36
Figura 31: Elaboración de los muros (a) modelo 1 (T1) (b) modelo 2 (T2).....	36
Figura 32: Curado de los muros	38
Figura 33: Muros elaborados.....	38
Figura 34: Escaneos horizontales y verticales en los muros – cara F	39
Figura 35: Escaneos horizontales y verticales en los muros – cara G	39
Figura 36: Influencia del acero transversal (M10 G2 arriba T1 – barras de 1/2")	43
Figura 37: Influencia del acero transversal (M9 F3 derecha – barras de 1/2") .	44
Figura 38: Influencia del acero transversal (M11 F2 derecha – barras de 3/8")	45
Figura 39: Influencia de los aceros longitudinales separados 50 mm	47
Figura 40: Influencia de los aceros longitudinales separados 100 mm	49
Figura 41: Señal del detector de metales en MATLAB.....	55
Figura 42: Señal del detector de metales en MATLAB.....	57
Figura 43: Separación en bloques del escaneo (M9F3 derecha).....	58
Figura 44: Escaneo M9F3 derecha (barras de 1/2").....	59
Figura 45: Filtro 1 – sección uno (M9F3 derecha).....	60
Figura 46: Filtro 2 - sección tres (M9F3 derecha).....	61
Figura 47: Filtro 1 y 2 – sección dos (M9F3 derecha)	62
Figura 48: Escaneo M2F2 derecha (barras de 5/8").....	63
Figura 49: Interfaz del programa	64
Figura 50: Imágenes del puente en construcción.....	65

Figura 51: Escaneo superior de arranque del puente	65
Figura 52: Escaneos del puente.....	66
Figura 53: Escaneo de cisterna.....	67
Figura 54: Procesamiento de señales – Tacna	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ensayos no destructivos para determinar propiedades estructurales y evaluar condiciones del concreto según ACI 228.2R-13.....	5
Tabla 2: Velocidad de ultrasonido en diferentes materiales	7
Tabla 3: Impedancia acústica de algunos materiales.....	8
Tabla 4: Parámetros de control	31
Tabla 5: Secuencia de mezclado	32
Tabla 6: Ensayos de control preliminares en concreto.....	34
Tabla 7: Fecha de vaciado y compactación de cada muro	37
Tabla 8: Ensayos de control en vigas de concreto	41
Tabla 9: Dispersión del concreto	42
Tabla 10: Influencia del acero transversal.....	46
Tabla 11: Influencia del acero transversal encontrado según su profundidad..	46
Tabla 12: Influencia de los aceros longitudinales distanciados 50 mm	48
Tabla 13: Influencia de los aceros longitudinales encontrados según su profundidad	48
Tabla 14: Influencia de los aceros longitudinales distanciados 100 mm	50
Tabla 15: Influencia de los aceros longitudinales encontrados según su profundidad	50
Tabla 16: Probabilidad referencial al detectar esferas entre barras longitudinales separadas 50 mm.....	51
Tabla 17: Probabilidad referencial al detectar esferas entre barras longitudinales separadas 100 mm.....	51
Tabla 18: Detección de esfera con barras transversales separadas 50 mm....	52
Tabla 19: Detección de esferas ubicadas entre barras alejadas más de 100 mm	53
Tabla 20: Esferas detectadas.....	53

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El concreto es el material de construcción más utilizado en todo el mundo debido a su alta resistencia y bajo costo en comparación con otras alternativas (Ajwad et al. 2018). Sin embargo, en ocasiones la calidad del concreto no es la adecuada debido a malas prácticas en la colocación de este material. Por ejemplo las cangrejeras son un problema usual debido a estas malas prácticas y, dependiendo de su tamaño, pueden tener trascendencia estructural (Pasquel 2010). Las cangrejeras aparecen en la superficie del concreto y en ocasiones son de gran magnitud que afectan el núcleo del concreto. Estos vacíos internos no se aprecian a simple vista y pueden causar una disminución considerable de las propiedades de los elementos de concreto. Una manera rudimentaria de ubicarlos es por medio de extracciones de núcleos de concreto, sin embargo, el proceso involucrado en extraer muestras, retrasa y encarece el costo de una construcción (Carino 1984).

Otra manera de localizar estos defectos internos en el concreto es usando ensayos no destructivos (NDT por sus siglas en ingles). Por definición, los NDT son realizados para determinar algunas propiedades y condiciones del concreto sin deteriorarlo ni destruirlo (ACI 228.2R 2013), por lo tanto, se pueden realizar numerosas pruebas en los elementos analizados. Uno de estos métodos consiste en el uso de ondas pulso eco ultrasónicas para la ubicación de vacíos en el concreto. Un equipo pulso eco ultrasónico emplea una combinación de transductores piezoeléctricos, los cuales permiten analizar un elemento por una sola cara sin tener la necesidad de acceder a la cara opuesta del elemento.

El método pulso eco fue utilizado desde 1984 por Carino, con el fin ubicar vacíos internos en el concreto. Más adelante, se desarrolló una técnica de apertura sintética de enfoque (SAFT por sus siglas en ingles), el cual es un post-procesamiento de señal, que optimiza el resultado de un escaneo de área al localizar defectos con un equipo pulso eco (Doctor et al. 1986). Investigaciones tales como las de Shandiz et al. (2001) y Hosseini et al. (2008) utilizaron esta técnica para localizar vacíos.

En el año 2010, Tong et al. perfeccionaron el algoritmo SAFT utilizando la transformada de Hilbert Huang para detectar vacíos dentro del concreto. En la figura 1a se aprecia un elemento de concreto con una discontinuidad, el cual fue escaneado con un equipo pulso eco ultrasónico. En las figuras 1b y 1c se muestran las imágenes del escaneo mencionado con el SAFT tradicional y con el SAFT mejorado respectivamente. Como se aprecia en estas imágenes, el nuevo SAFT muestra el defecto sin sombras a su alrededor. Esta nueva técnica fue utilizada en investigaciones posteriores tales como las de Cassidy et al. (2011) y De La Haza et al. (2013). Por último, en el año 2016, Haach y Ramirez utilizaron la técnica de reconstrucción simultanea iterativa (SIRT por sus siglas en ingles), para detectar discontinuidades dentro del concreto (en este caso se usaron cilindros de poliestireno expandido como discontinuidades). Esta técnica utiliza únicamente dos transductores, un emisor y receptor, por lo que se necesita un gran número de mediciones para obtener imágenes aceptables.

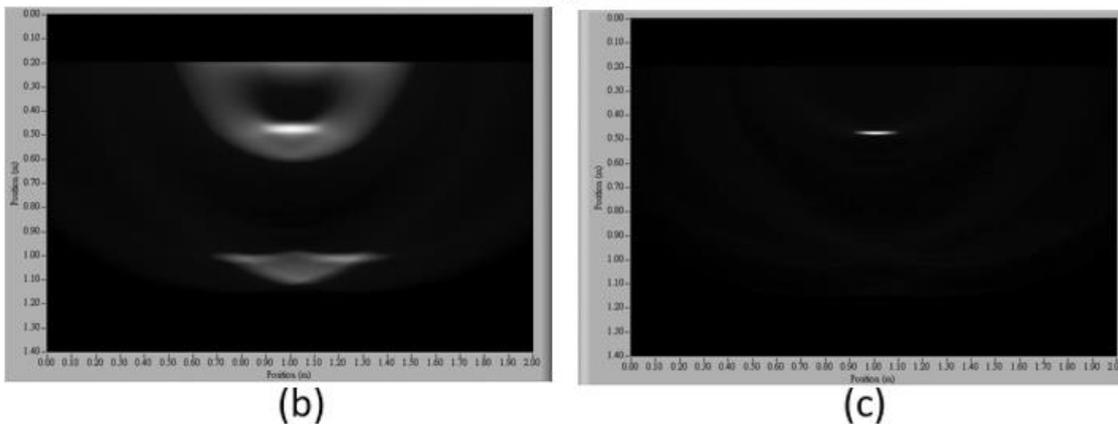
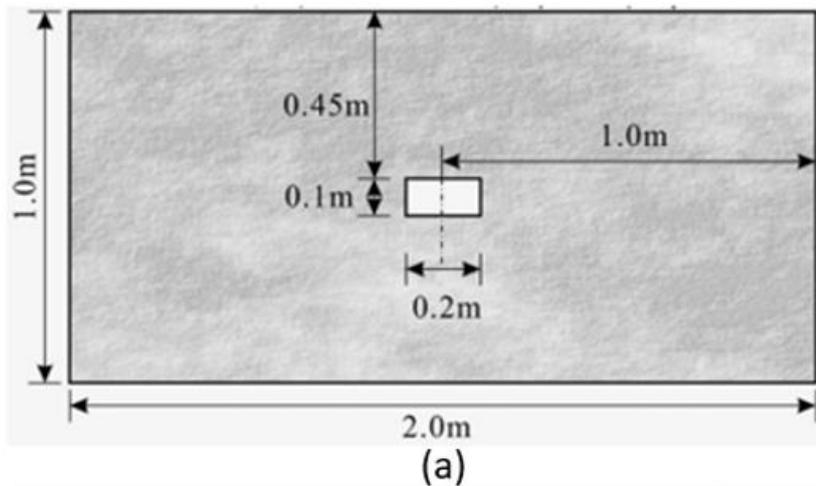


Figura 1: Ejemplo de un escaneo con un equipo de ultrasonido
 (a) Elemento escaneado (b) SAFT tradicional (c) SAFT mejorado

Fuente: Tong 2010

No obstante, en todos estos estudios las dimensiones de los elementos internos o vacíos eran de gran tamaño, los cuales no son típicos en espesores de edificaciones de concreto. En el año 2015, se elaboraron elementos de concreto con esferas de poliestireno expandido de 14, 25 y 50 mm de diámetro, que simulan ser los vacíos internos, con la finalidad de calcular cuál es la probabilidad de detectarlos con ondas eco ultrasónicas de 50 kHz de frecuencia (Lipa et al., se utilizó el SAFT mejorado). Como conclusión de esta investigación se encontró que existe una probabilidad de 82.35% en detectar esferas de 50 mm de diámetro de poliestireno expandido en elementos de concreto de 150 mm de espesor; y probabilidades menores en esferas de menor tamaño.

De lo mencionado, es necesario recalcar que aún no se han realizado investigaciones para detectar vacíos en elementos de concreto armado, donde los vacíos o elementos internos se encuentren muy cerca a las barras de acero. Además, tampoco existe un cálculo de la influencia que los aceros puedan ocasionar en los escaneos con un equipo pulso eco ultrasónico en elementos de concreto.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

El fin del proyecto es contribuir en el estudio e investigación de los ensayos no destructivos con una metodología en la localización de vacíos internos en el concreto armado utilizando ondas de ultrasonido.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Escaneos de muros de concreto armado a los que se colocaron esferas de poliestireno expandido en diferentes ubicaciones.
- b. Evaluación de la incidencia de barras de acero de diferente diámetro en los escaneos de ultrasonido.
- c. Elaboración de una metodología para detectar vacíos internos en elementos de concreto armado, que incluye un procesamiento de imágenes opcional.

1.3. ALCANCES

La investigación abarcará únicamente el uso de barras de acero de diámetros 3/8", 1/2" y 5/8", y elementos de concreto con una resistencia característica a la compresión de 210 kg/cm². Estas barras de acero y esta resistencia característica son las más utilizadas en el diseño y construcción de edificaciones de concreto armado en el Perú y algunos países de Latinoamérica.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EL CONCRETO

El ACI 228.2R resume algunos ensayos no destructivos útiles para evaluar elementos estructurales de concreto, los cuales se muestran en la tabla 1 (2013).

Según este reporte, el ACI sugiere el método pulso eco como uno de los métodos primarios en la localización de vacíos dentro del concreto.

Tabla 1: Ensayos no destructivos para determinar propiedades estructurales y evaluar condiciones del concreto según ACI 228.2R-13

PROPIEDAD/CONDICIÓN	MÉTODO	
	PRIMARIO	SECUNDARIO
Resistencia a la compresión del concreto (ACI 228.1R)	Extracción y ensayo de núcleos de concreto (ASTM C42 y C39) o pull out (ASTM C900)	Resistencia a la penetración (ASTM C803)
Resistencia a la tracción del concreto	Ensayo brasilero o splitting test (ASTM C496)	Ensayo pull off (ACI 503.1R)
Densidad	Densidad relativa (ASTM C642)	Nuclear gauge (ASTM C1040)
Módulo de elasticidad estático del concreto	Extracción y ensayo de núcleos de concreto (ASTM C42 y C39)	-
Módulo de elasticidad dinámico del concreto	Frecuencia resonante de especímenes cortados (ASTM C469)	Velocidad de pulso ultrasónico (ASTM C597) o pulso eco
Contenido de aire, contenido de cemento y propiedades de los agregados	Petrografía de muestras de concreto (ASTM C856)	Petrografía de agregados (ASTM C294)
Reactividad alcali - silice	Ensayo rápido Cornell/SHRP (SHRP-C-315) o petrografía	-
Carbonatación	Fenoltadeina, medidor de PH o sensores de fibra óptica embebidos en el concreto	Otros indicadores de PH (por ejemplo, papel litmus)
Daño de fuego	Petrografía o esclerometría (ASTM C805)	SASW (*), ultrasonido, impacto eco
Daño por congelamiento y descongelamiento	Petrografía	SASW (*) o ultrasonido
Ubicación de barras de acero	Detector de metales o georadar (GPR por sus siglas en inglés) (ASTM D4748)	radiografía por rayos X y rayos gamma
Espesor del concreto	Pulso eco o GPR	-
Localización de delaminaciones, vacíos y otros defectos ocultos	Pulso eco, termografía (ASTM D4788), GPR (ASTM D6087) y sonido (ASTM D4580)	Inspección por la velocidad de ultrasonido (UPV por sus siglas en inglés)

(*) "Spectral Analysis of Surface Waves"

2.2. ONDAS SONORAS

Las ondas sonoras son ondas mecánicas que se transmiten a través del aire, el agua, cuerpos sólidos, entre otros (a excepción del espacio vacío). La velocidad de estas ondas depende de la densidad, compresibilidad, rigidez, módulo de poisson, entre otros, del material que atraviesan. Cuando el medio de transferencia es uniforme, la aceleración del sonido es prácticamente nula por lo que se transfiere a velocidad constante (Fernández 1994) (Véase ecuación 1).

$$\text{Distancia} = \text{Velocidad} \times \text{Tiempo} \quad \text{eq. (1)}$$

Las ondas sónicas que se propagan a través de un cuerpo elástico son:

- **Ondas P o de compresión:** El movimiento de las ondas es paralela a la dirección de la propagación. Se propaga en todo tipo de materiales menos en el espacio vacío (véase figura 2a)
- **Ondas S o de corte:** El movimiento de las ondas es perpendicular a la dirección de la propagación. Se propaga únicamente en elementos sólidos, ya que los líquidos y gases no soportan esfuerzos de corte (véase figura 2b).
- **Ondas superficiales:** El movimiento de las ondas se da en la superficie plana o curva de los materiales. Este tipo de ondas se produce por la combinación de las ondas P y S.

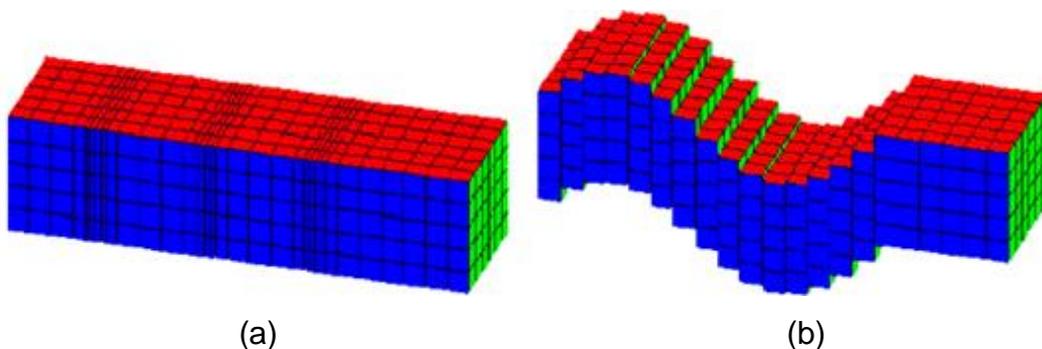


Figura 2: Ondas mecánicas (a) Ondas P (b) Ondas S

Fuente: adaptado de imágenes de la Universidad de Coruña

En la tabla 2 se muestran las velocidades aproximadas de las ondas P, S y superficiales en diferentes materiales. Como se aprecia en esta tabla el poliestireno, el agua y el aire poseen la densidad y la transmisión de ondas P más bajas, por lo que algunas propiedades, como la impedancia acústica, en estos materiales son muy cercanas.

Tabla 2: Velocidad de ultrasonido en diferentes materiales
Fuente: (Lide 2012)

MATERIAL	DENSIDAD (g/cm ²)	VELOCIDAD ONDA P (m/s)	VELOCIDAD ONDA S (m/s)	VELOCIDAD SUPERFICIAL (m/s)
Aluminio	2.7	6420	3040	5000
Hierro	7.85	5960	3240	5200
Plata	10.4	3650	1610	2680
Oro	19.7	3240	1200	2030
Acero	7.85	5960	3235	5200
Vidrio	2.32	5640	3280	5170
Poliestireno	1.06	2350	1120	2240
Agua destilada	0.998	1496	-	1496
Aire	~ 0	346	-	346

Por otra parte, por definición, la frecuencia de una onda indica cuantas oscilaciones son transferidas por cada segundo. El sonido se clasifica según su frecuencia en infrasonido (menores a 16 Hz), sónica o audible (entre 16 y 20000 Hz), y ultrasonido (mayores a 20 kHz, Fernández 1994).

2.3. IMPEDANCIA ACÚSTICA

La impedancia acústica es la resistencia que opone un material a ser atravesado. Esta propiedad de los materiales se obtiene multiplicando la velocidad del sonido en el mismo por su densidad (ACI 228.2R 13). La transferencia de ondas de un elemento a otro depende de la diferencia de impedancias de ambos materiales, si ambos materiales tienen una impedancia cercana, la energía transferida será

mayor que si las impedancias son muy distintas. La impedancia acústica de un material se obtiene por medio de la siguiente fórmula (Fernández 1994):

$$Z = \rho * V \quad \text{eq. (2)}$$

Dónde:
 Z: Impedancia acústica.
 ρ: Densidad del material.
 V: Velocidad del sonido en el material.

La tabla 3 muestra valores típicos de impedancia de algunos materiales. Como se aprecia en esta tabla, el aire tiene la impedancia más baja que los otros materiales.

Tabla 3: Impedancia acústica de algunos materiales
 Fuente: Carino 2004

MATERIAL	IMPEDANCIA ACÚSTICA "Z", kg/(m ² *Seg)
Aire	0.4
Agua	1,5*10 ⁶
Suelo	(0.3 a 4)*10 ⁶
Concreto	(7 a 10)*10 ⁶
Acero	47*10 ⁶

2.4. REFLEXIÓN DE ONDAS MECÁNICAS

La reflexión y transferencia de las ondas de un material a otro se obtiene, en porcentaje, por medio de las siguientes fórmulas (ACI 228.2R 13):

$$R = \frac{(Z_1 - Z_2)}{(Z_1 + Z_2)} * 100 \quad \text{eq. (3)}$$

$$T = 100 - R \quad \text{eq. (4)}$$

Dónde:
 Z1: Impedancia del material 1.
 Z2: Impedancia del material 2.
 R: Porcentaje de reflexión de las ondas.
 T: Porcentaje de la transferencia de las ondas.

Un equipo pulso eco ultrasónico, mide el tiempo de viaje de las ondas en recorrer un elemento hasta el extremo posterior y regresar. Si las ondas se encontrasen con una discontinuidad, las ondas rebotan en esta y regresan en un menor tiempo. Para comprobar que el poliestireno es un buen material como para simular los vacíos (aire), se tiene que comprobar que la reflexión concreto-aire sea parecida a la reflexión concreto-poliestireno. Para esto, se debe primero calcular la impedancia acústica del poliestireno. Para el cálculo de esta propiedad se utilizará la velocidad de onda longitudinal ("P") y densidad del poliestireno de la tabla 2. Entonces, a partir de la ecuación 2, se obtiene la impedancia acústica del poliestireno.

$$Z_{poliestireno} = \rho * V = 10.6 X 2350 = 24910 \text{ kg}/(m^2 \times \text{seg}) \quad \text{eq. (5)}$$

Segundo, con las ecuaciones 3 y 5, y la impedancia del aire y concreto de la tabla 3, se obtiene la reflexión de la onda entre concreto – aire y concreto - poliestireno:

- Reflexión concreto - aire

$$R = \frac{(7 \times 10^6 - 0.4)}{(7 \times 10^6 + 0.4)} \times 100 = 99.99 \% \quad \text{eq. (6)}$$

- Reflexión concreto – poliestireno

$$R = \frac{(7 \times 10^6 - 24910)}{(7 \times 10^6 + 24910)} \times 100 = 99.29 \% \quad \text{eq. (7)}$$

Se aprecia que la reflexión entre concreto – aire y concreto - poliestireno es muy similar, por lo que este material es ideal para simular los vacíos (eq. 6 y 7). Sin embargo, en esta investigación se utilizó poliestireno expandido para simular los vacíos, el cual es más poroso y menos denso que el poliestireno convencional, por lo que la reflexión es aún más cercana a la reflexión concreto – aire (En el Perú el poliestireno expandido es conocido como tecnopor).

2.5. EQUIPOS DE ULTRASONIDO Y DE DETECCIÓN DE METALES UTILIZADOS EN EL CONCRETO

2.5.1. EQUIPOS DE ULTRASONIDO PARA CONCRETO

Un dispositivo de ultrasonido tradicional está equipado con un transductor emisor y un transductor receptor. Este aparato permite medir el tiempo que demoran las ondas ultrasónicas en atravesar un elemento del transductor emisor al receptor. Para realizar un escaneo con ultrasonido por el método directo es necesario que emisor y receptor estén alineados entre sí para medir el tiempo de transferencia entre ambos, para esto, es necesario tener acceso a las dos caras opuestas del elemento en análisis (Carino 2004, véase figura 3). Por otra parte, ahora se cuenta con un equipo pulso eco ultrasónico el cual posee una combinación de transductores emisores y receptores en una sola cara. En este equipo el campo ultrasónico generado por los emisores se transmite dentro del concreto y es reflejado en la cara opuesta del elemento analizado (rebote de ondas), para luego retornar en forma de eco al equipo (Carino 2014, véase figura 4).

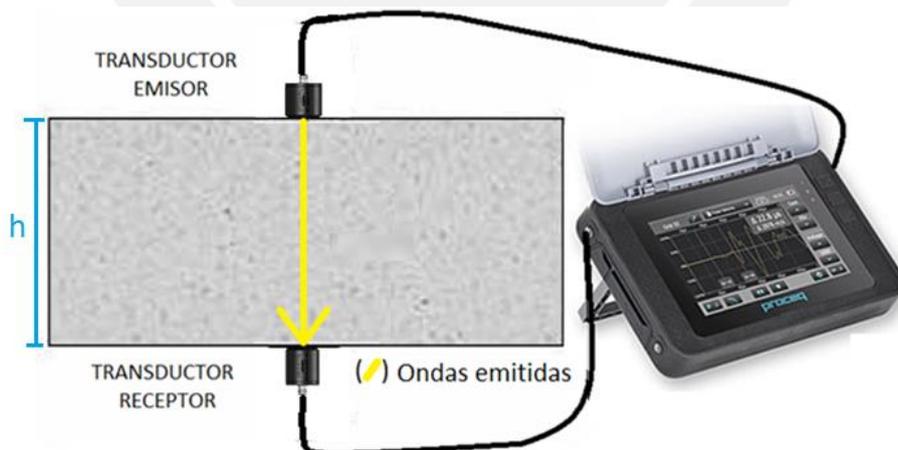


Figura 3: Método directo - Equipo de ultrasonido tradicional

Fuente: Adaptado de Manual Proceq pundit 2017

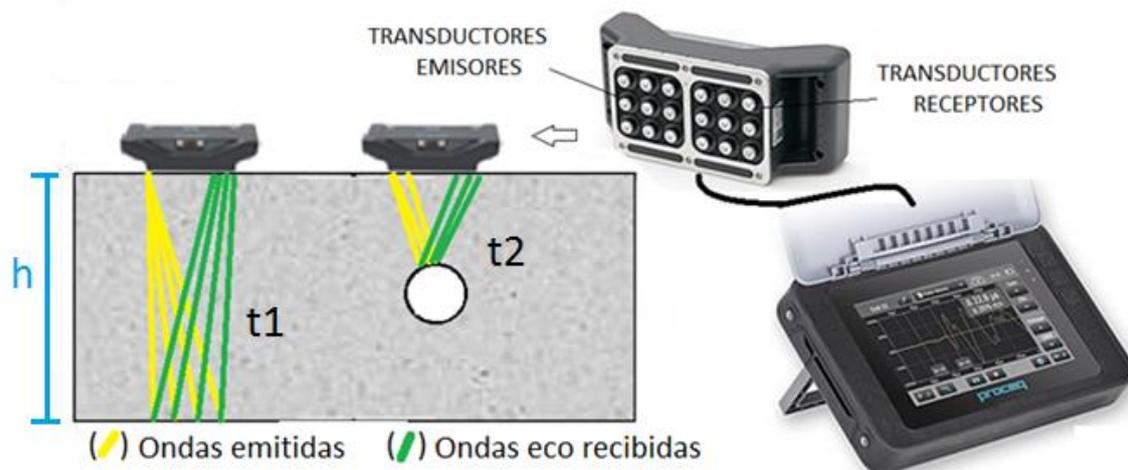


Figura 4: Método pulso eco - Equipo de pulso eco ultrasónico

Fuente: Adaptado de Manual Proceq pundit 2017

Por ejemplo, en las figuras 3 y 4 se muestran dos elementos de concreto que tienen el mismo espesor (“h”) y fueron elaborados con el mismo concreto. Estas vigas son escaneadas usando un equipo de ultrasonido tradicional (método directo) y un equipo pulso eco ultrasónico (método pulso eco) respectivamente. En la figura 4, la onda de ultrasonido tiene que recorrer una longitud de h, desde el emisor al receptor, sin embargo, en la figura 4, en la zona sin vacío, la onda recorre una distancia un poco mayor a 2h (ida y vuelta). También, en esta misma figura se muestra que el tiempo que demora una onda en recorrer el espesor de h es “t1”, sin embargo, si existiese un vacío interno, como se aprecia en el elemento, las ondas rebotarían en el vacío y retornarían en menor tiempo a los receptores (“t2”).

2.5.2. CARACTERÍSTICAS DE UN EQUIPO PULSO ECO ULTRASÓNICO

a) Frecuencia y longitud de onda

Para escaneos en concreto es común utilizar un equipo de ultrasonido tradicional o pulso eco ultrasónico con frecuencias de 50 kHz, ya que de este modo se evitan que las ondas reboten en el agregado del concreto (Malhotra y Carino

2004). Lo ideal es que el agregado tenga dimensiones menores a la longitud de onda, para que así, el agregado no aparezca en las imágenes de ultrasonido. En la ecuación 8 se demuestra que el agregado de tamaño máximo nominal (TM) de 1" (19 mm), el cual fue utilizado para las mezclas de concreto, es menor a la mitad de la longitud de onda.

$$\lambda/2 = \frac{v}{f} * \frac{1}{2} = \frac{2100 \frac{m}{seg}}{50000Hz} = 0.042m = 42 mm > 1" (25.4 mm) \quad \text{eq. (8)}$$

Donde:

λ : Longitud de onda

v : Velocidad aproximada de la onda S en el concreto (en este caso se ha considerado 2100 m/s).

Por otra parte, una regla general es que si se quiere tener una probabilidad razonable de detectar discontinuidades, estas deben ser mayores a la mitad de la longitud de onda (Martin 2010). Por lo tanto por regla general se podría detectar vacíos con un diámetro mayor a 21 mm.

b) Detalles del equipo

Para el escaneo con ondas de ultrasonido, se utilizó un equipo pulso eco Proceq PUNDIT PL200PE. Este equipo cuenta con 9 emisores y 9 receptores que funcionan como transductores de punta. Estos transductores tienen una frecuencia de 50 kHz y calculan el tiempo de transferencia de las ondas transversales (ondas S) de los emisores a los receptores. En la figura 5 se muestra la cara de transductores del equipo pulso eco ultrasónico utilizado, el cual tiene 110 mm de ancho y 160 mm de largo. Cada letra en roja es un transductor emisor y cada letra en azul un transductor receptor, en el cual el transductor emisor A trabaja únicamente con el receptor A, el emisor B con el receptor B, y así sucesivamente.



Figura 5: Equipo pulso eco ultrasónico

Fuente: Adaptado de Manual Proceq pundit 2017

c) Velocidad de onda de ultrasonido (Onda "S")

Si se conoce el espesor del elemento de concreto, la velocidad de onda "S" se puede hallar por medio del tiempo de llegada de la onda. En la figura 6 se muestra la ecuación utilizada para calcular la velocidad de la onda entre el transductor emisor A y el receptor A. Tener en cuenta que el equipo calcula la velocidad de onda "S" promedio de todos los pares de transductores.

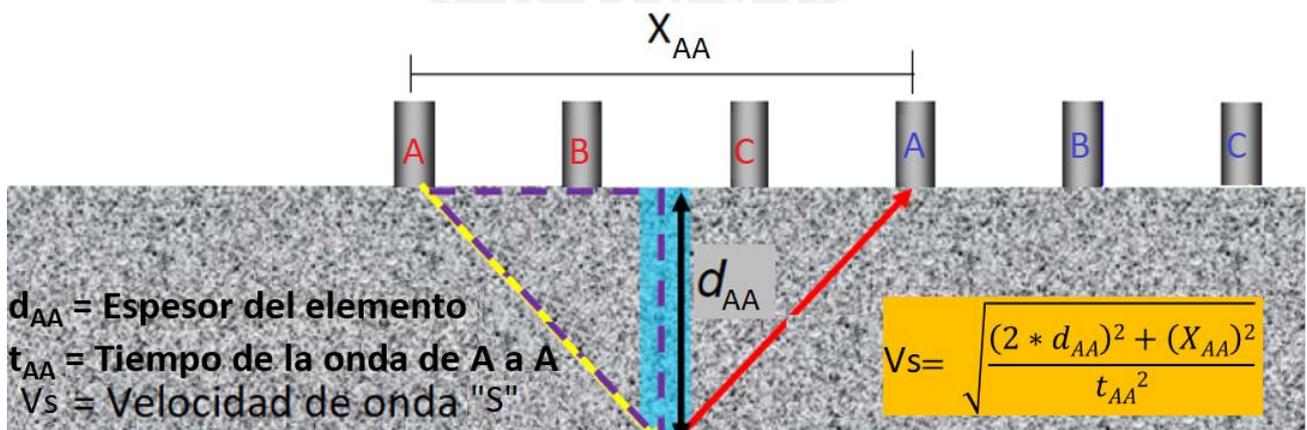


Figura 6: Calculo de la velocidad de la onda "S"

Fuente: Adaptado de Carino 2014

En el caso de que no se conociese el espesor del elemento, con el equipo se puede estimar la velocidad de la onda ultrasónica “S” por medio de ondas superficiales. En este caso, el equipo utiliza el tiempo de viaje de la onda superficial y la distancia entre cada par de transductores. En la figura 7 se muestra el cálculo de la velocidad de la onda superficial entre el par de transductores AA. Tener en cuenta que el equipo calcula la velocidad superficial promedio de todos los pares de transductores. Luego, la velocidad de la onda “S” se estima por medio de la ecuación 9 (Krautkrämer and Krautkrämer 1990).

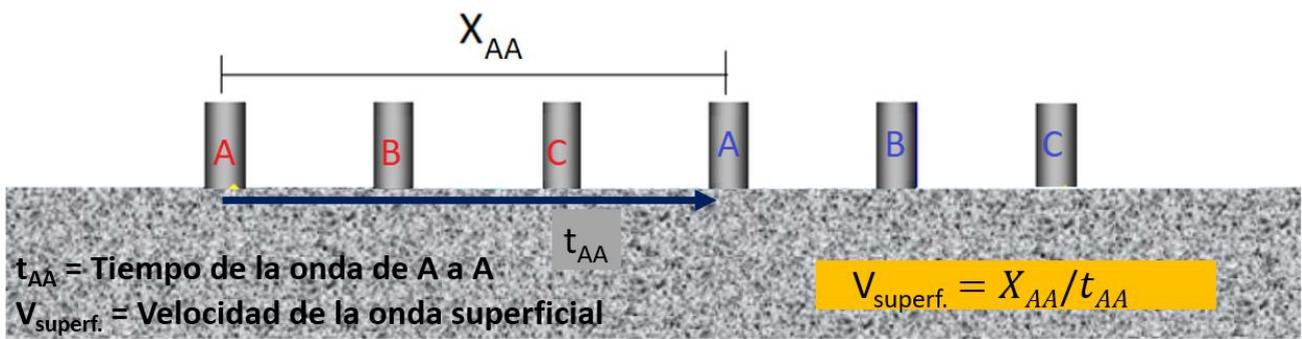


Figura 7: Cálculo de la velocidad de la onda superficial

Fuente: Adaptado de Carino 2014

$$\frac{V_{superf}}{V_S} = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad \text{eq. (9)}$$

Dónde: ν = Módulo de Poisson

Si se considera un módulo de Poisson entre 0.15 y 0.25 se obtiene que las ondas superficiales viajan a una velocidad entre 90 y 92% de la velocidad de la onda “S” (ACI 228.2R 2013).

d) Algoritmo SAFT

Este equipo permite detectar discontinuidades en elementos de concreto por medio de una ecuación de Pitágoras entre cada par de transductores. En la figura 8 se muestra un esquema de cómo se calcula la profundidad de una

discontinuidad entre el par de transductores AA por medio del tiempo de viaje de la onda. El algoritmo SAFT realiza una convolución de todas las señales obtenidas por cada par de transductores, para así ubicar las discontinuidades en un elemento de concreto. En el caso de que no existiese alguna discontinuidad, el equipo mide el espesor del elemento.

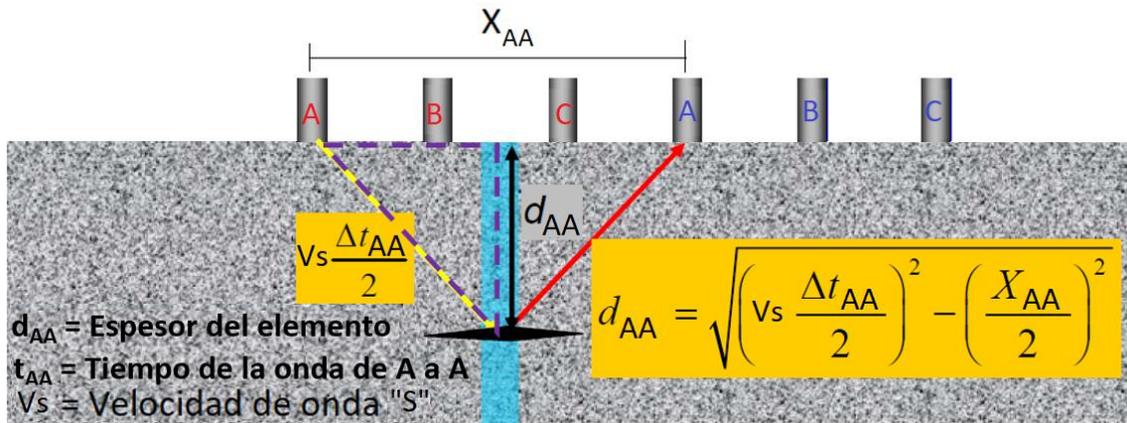


Figura 8: Técnica de apertura sintética de enfoque (SAFT)

Fuente: Adaptado de Carino 2014

e) Escaneos parciales

En la figura 9 se muestra un escaneo parcial, en el cual el eje "x" es el tiempo en microsegundos y el eje "y" es la intensidad de las ondas recibidas por los transductores receptores (amplitud). Los picos altos indican que el receptor del equipo ha registrado una gran cantidad de ondas que han regresado en un tiempo dado. En este ejemplo, las ondas han demorado un tiempo de 59.7 microsegundos y si es que se conoce la velocidad de las ondas, es posible calcular la profundidad de rebote con la fórmula de la figura 8.

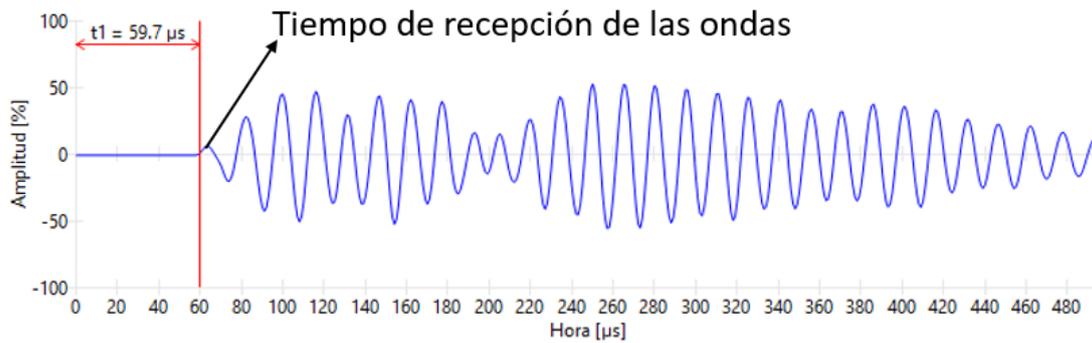


Figura 9: Escaneo parcial

f) Mapa de colores del equipo

Por defecto, el mapa de colores del equipo es del tipo “Jet”, el cual se puede cambiar si se desea. En la figura 10 se muestra la escala de colores tipo “Jet” del equipo. Un escaneo parcial es graficado como imagen según la intensidad de su señal. Tener en cuenta que la intensidad de la señal es tomada en valor absoluto.



Figura 10: Escaneo parcial

g) Escaneo en franjas

Este equipo permite realizar un escaneo de área, en franjas, en un elemento. Como ya se mencionó, la cara de los transductores tiene un ancho de 110 mm, por lo que una franja escaneada posee aproximadamente este mismo ancho. En la figura 11 se muestra un escaneo en franja de un elemento de concreto.

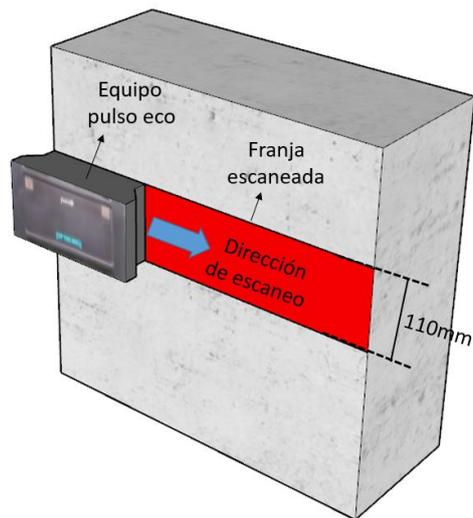


Figura 11: Franja escaneada

Para realizar un escaneo en franja es necesario obtener escaneos parciales sobre toda la longitud de la franja, ya que la longitud de la franja es mucho mayor a la longitud de la cara de transductores (160 mm). La distancia entre estos escaneos parciales es definida por el operador y se superponen si es menor a estos 160 mm. El ancho de cada escaneo parcial es de la misma dimensión que la distancia entre escaneos parciales, ya que el equipo promedia sus resultados en la zona central de su cara de transductores, es decir, en la mitad de la longitud de 160 mm. Como se aprecia en la figura 12, el escaneo parcial tiene una dimensión de "x", al igual que la distancia entre estos escaneos (lado izquierdo). También se aprecia que cada escaneo se muestra en la parte central de la longitud de cara de transductores (lado derecho).

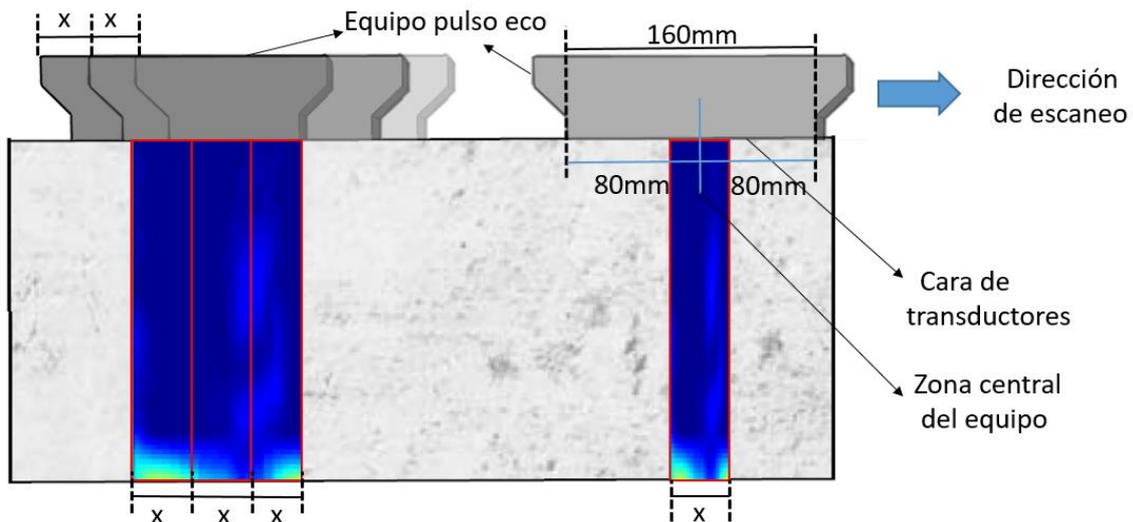


Figura 12: Escaneos parciales

Tener en cuenta que si la distancia entre escaneos parciales es menor, la reconstrucción de la imagen tiene una mayor resolución. Se recomienda como distancia entre escaneos parciales de 10 mm para escaneos cortos y 20 mm para escaneos largos. Este equipo permite escanear franjas únicamente de izquierda a derecha.

h) Compensación horizontal

Como se muestra en la figura 12, un equipo pulso eco ultrasónico promedia su resultado en la zona central de la cara de transductores, por lo que cuando se realiza un escaneo de franja de borde a borde en un elemento, se pierde una cierta dimensión inicial y final de la franja total. En esta investigación, a estas dimensiones perdidas se les denominará compensación horizontal y para el caso de este equipo esta medida es de 80 mm aproximadamente (la mitad de la longitud de la cara de transductores). En la figura 13 se muestra un escaneo de borde a borde en un elemento de concreto. En este caso el escaneo parcial tiene un ancho de 10 mm y una compensación horizontal aproximada de 80 mm inicial y final (la mitad de la longitud de la cara de transductores). Tener en cuenta que estos 80 mm pueden disminuir si el ancho de cada escaneo parcial es mayor.

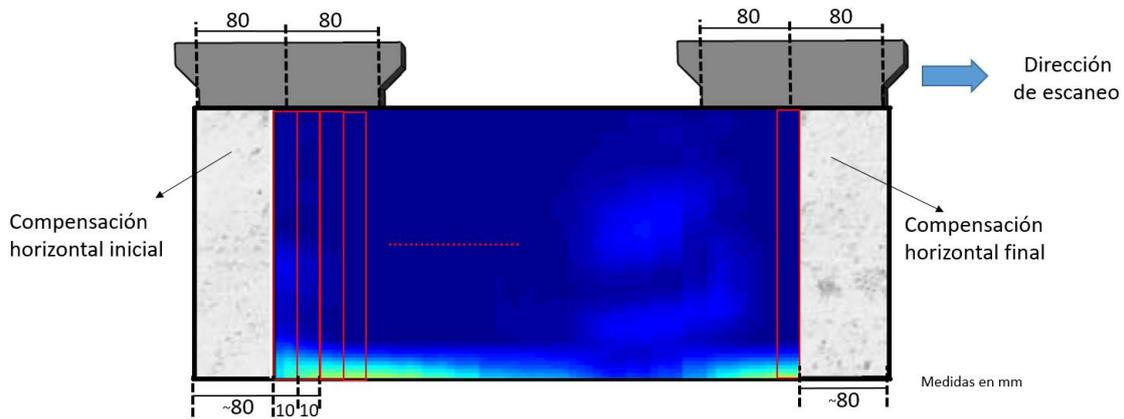


Figura 13: Compensación horizontal

i) Reconstrucción de la imagen

En un escaneo de área, el ancho de la franja escaneada es promediado en una línea longitudinal central, por lo que el resultado del escaneo de área será el eje longitudinal de la franja versus la profundidad del elemento analizado. En la figura 14 se muestra el escaneo de un elemento en franja de borde a borde, en el cual se ha reconstruido la imagen por medio de escaneos parciales. Además se muestra que hay una zona inicial y final que no fue reconstruida debido a la compensación horizontal mencionada anteriormente.

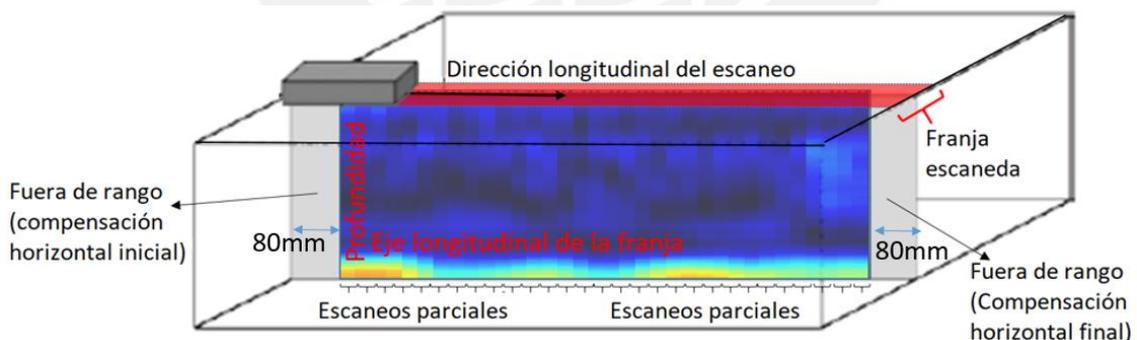


Figura 14: Reconstrucción de la imagen de ultrasonido

j) Detalles de una imagen de ultrasonido y ajuste de la coloración

En la figura 15a se muestra el escaneo de un elemento de concreto de 0.155 x 0.155 x 0.53 m y en la figura 15b el escaneo de ultrasonido obtenido de la figura 15a. En esta última figura se aprecia que el escaneo no tiene los 0.53 m de la

longitud del elemento sino solo 0.37 m escaneados debido a la pérdida por compensación horizontal. Además se muestra el escaneo de ultrasonido con una mayor profundidad que el elemento con el fin de apreciar el fondo del elemento.

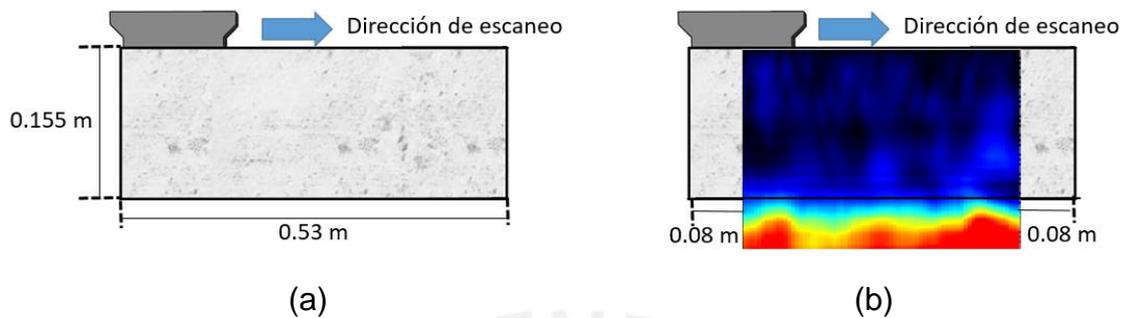


Figura 15: Reconstrucción de la imagen de ultrasonido

Para visualizar la imagen de ultrasonido se debe ajustar la coloración en un valor adecuado. Se recomienda ajustar la coloración con el fin de que el borde de color celeste o amarillo del fondo concuerde con el espesor real del elemento. En el caso de que no se conozca el espesor del elemento, la coloración se ajusta con tal que la amplitud máxima inicial de cada escaneo parcial concuerde con el borde de color celeste o amarillo. En la figura 16 se muestra el escaneo anterior con tres ajustes de color diferente. La figura 16a muestra una intensidad de color baja; la 16b el ajuste de color correcto, en este caso se ha ajustado el color al borde celeste del espesor escaneado, el cual concuerda con la máxima amplitud inicial del escaneo parcial "n"; y en la figura 16c una intensidad de color muy alta.

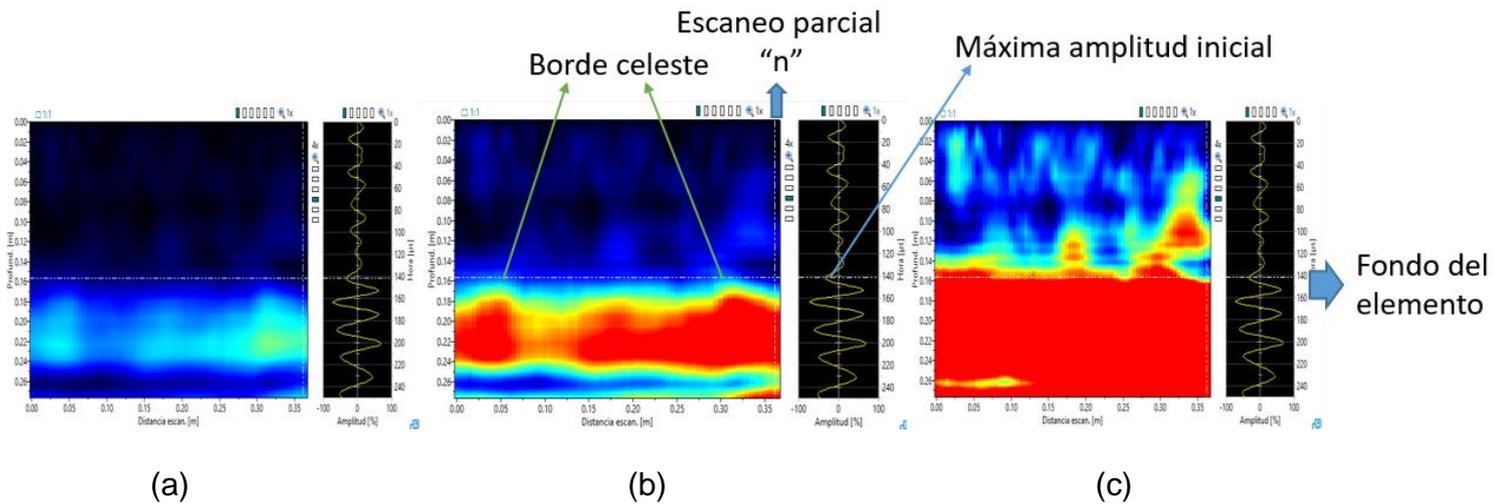


Figura 16: Ajuste de la coloración

(a) Intensidad muy baja (b) Intensidad correcta (c) Intensidad muy alta

En la figura 17 se muestra a detalle la imagen de ultrasonido de la figura 16b. En la figura 17a, se aprecia la imagen de ultrasonido el cual es un gráfico con ejes: dirección longitudinal del escaneo (distancia escaneada) vs la profundidad del elemento. En la figura 17b se aprecia la señal del escaneo parcial número 40, el cual es un gráfico tiempo (microsegundos) vs Amplitud (%). En la figura 17c se muestra los detalles del escaneo: la velocidad de onda “S” en este material (2212 m/s), la frecuencia de los transductores (50 kHz), el espaciado de cada escaneo parcial (5 mm), la cantidad de escaneos parciales (74), y la posición del cursor de líneas punteadas blancas en la imagen de ultrasonido.

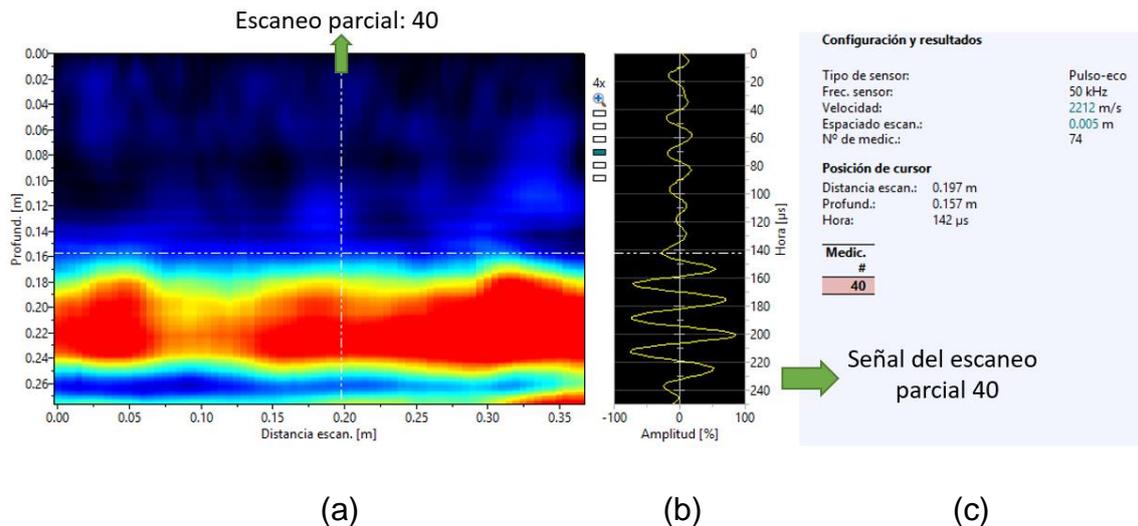


Figura 17: Detalles de una imagen de ultrasonido

(a) Imagen de ultrasonido (b) Señal del detector de metales (c) Detalles de ultrasonido

En el caso anterior, el elemento de concreto analizado no tenía ninguna discontinuidad en su interior por lo que las ondas viajaron hasta el fondo del elemento y regresaron a los receptores del equipo (véase figura 15). Como se aprecia en la figura 17b, desde el tiempo 0 hasta el tiempo 140 microsegundos no se muestran picos muy altos, por lo que se deduce que las ondas aún no regresan a los receptores del equipo. Sin embargo, Esto también se ve reflejado en la figura 17a, en el cual desde 0 hasta los 0.155 m aproximadamente se muestra una coloración de color negra y azulada. Sin embargo, en la figura 17b a partir de los 144 microsegundos los picos son de mayor amplitud por lo que se deduce que las ondas están llegando al equipo a partir de este tiempo. Esto también se ve reflejado en la figura 17a, ya que desde los 0.155 m a más profundidad se aprecia una coloración celeste, amarilla y roja.

k) Formas de detección de discontinuidades

Para el caso de análisis de discontinuidades, existen dos maneras de detectar un vacío u elemento interno dentro del concreto (Norma de referencia: ASTM

E1901). El primer caso es cuando las ondas ingresan al concreto, se reflejan en la discontinuidad y llegan a los receptores del equipo. En este caso la discontinuidad aparece como una mancha en la imagen escaneada dentro del espesor. El segundo caso es cuando las ondas ingresan al concreto, se reflejan en la discontinuidad, pero éstas no llegan a los receptores del equipo. En esta segunda opción, la discontinuidad se detecta cuando hay una abertura en el fondo, es decir, una abertura en el espesor escaneado. Por ejemplo, en la figura 18, se muestra el escaneo de una viga de 150 mm de espesor, con un cubo de poliestireno expandido de 50 mm en su interior. En esta viga se presenciaron los dos casos mencionados anteriormente: cuando se realizó el escaneo de la cara inferior longitudinal se apreció la interferencia como una mancha (primer caso), sin embargo, cuando se realizó el escaneo de la cara superior longitudinal se apreció una abertura en el fondo del espesor (segundo caso). Tener en cuenta que debido a estas aberturas en el fondo se recomienda mostrar una imagen con una profundidad mayor al espesor real del elemento.

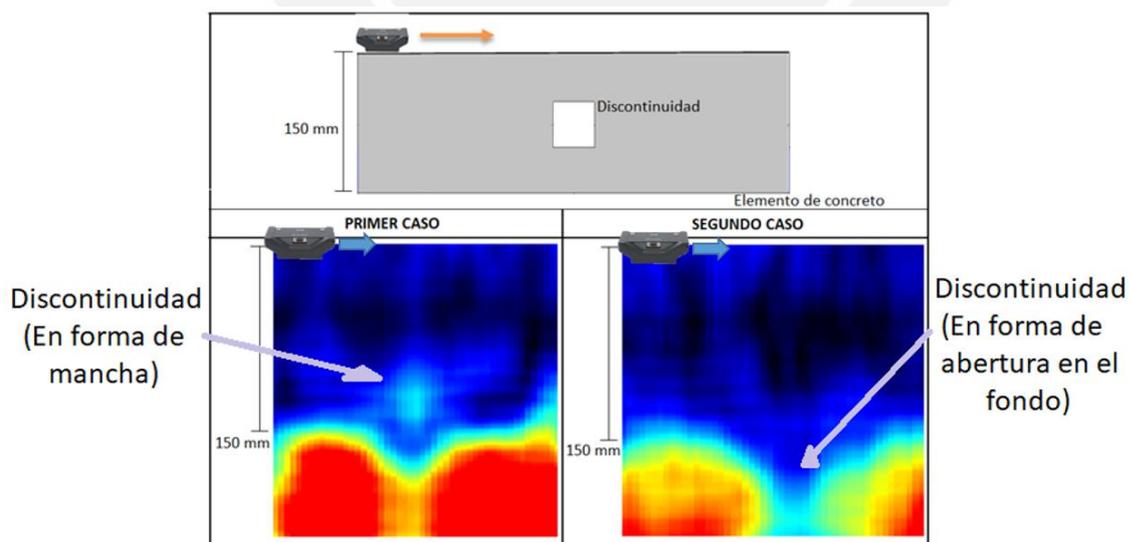


Figura 18: Modos de obtención de discontinuidades

I) Distancia horizontal y profundidad de discontinuidades

Una forma de determinar la distancia escaneada horizontal de una discontinuidad en un escaneo de ultrasonido es colocando el puntero, de líneas blancas punteadas, en la máxima amplitud inicial de la mancha (véase figura 19). En el caso de que no se muestre una mancha en el escaneo pero sí una abertura, el puntero se debe colocar en la parte central de esta. En los especímenes de concreto elaborados se utilizará una compensación horizontal inicial y final de 80 mm debido a que se escaneó de borde a borde. En la figura 19, se muestra un escaneo de borde a borde, en el cual aparece una discontinuidad como mancha y también deja una abertura en el fondo (los dos casos mencionados anteriormente). Esta discontinuidad se encuentra a una distancia de 0.212 m desde el inicio del escaneo (en la figura 19 se muestra en cursor position), sin embargo, a esta dimensión se le debe de sumar la distancia de la compensación horizontal inicial, es decir, la discontinuidad se detecta a $0.212 + 0.080 = 0.292\text{m}$ desde el extremo izquierdo de la cara transversal del elemento.

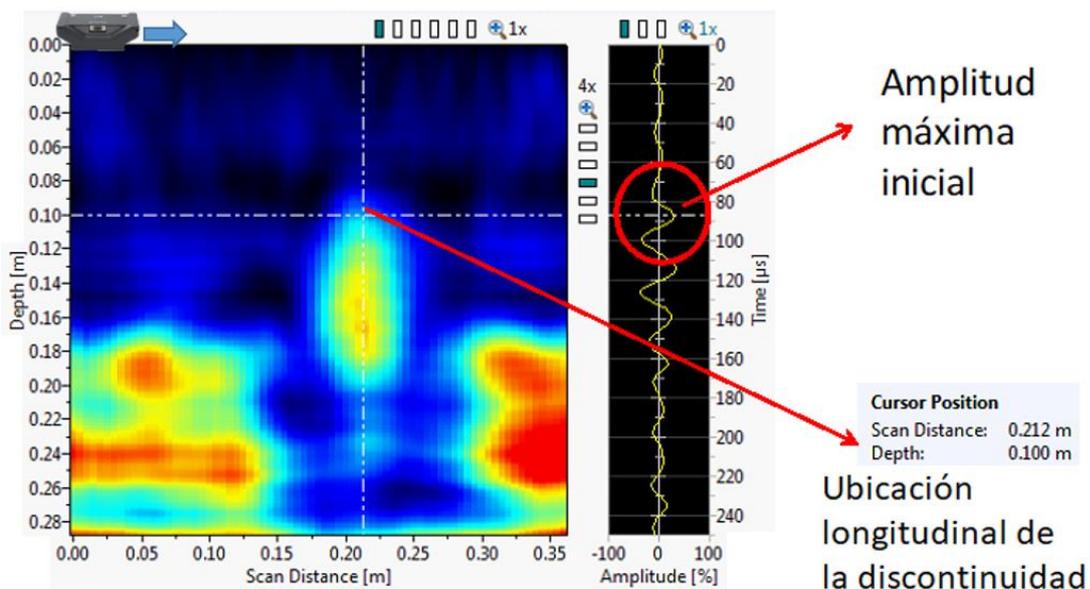
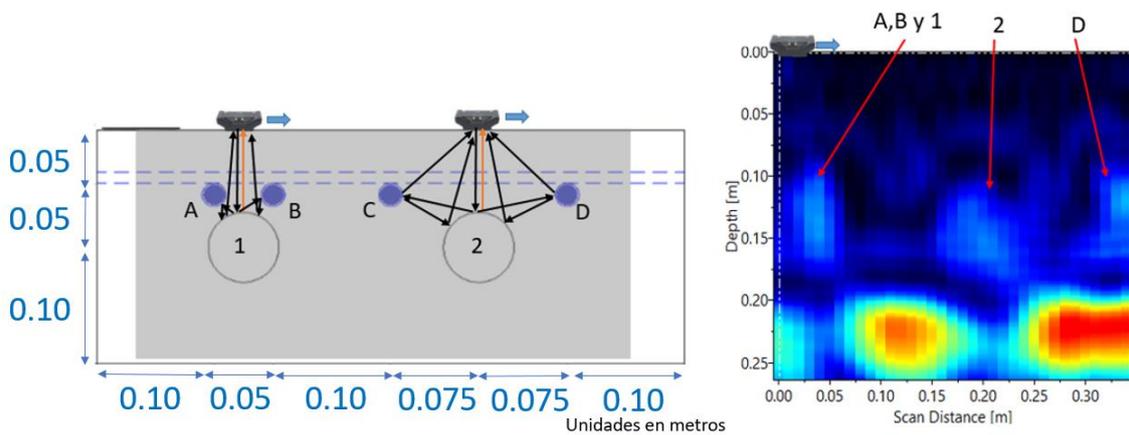


Figura 19: Ubicación horizontal de discontinuidad

También en la figura 19, se aprecia que la mancha se detecta a una profundidad de 0.100 m, sin embargo si la zona de la discontinuidad tiene otros elementos cercanos es posible que la mancha aparezca a mayor profundidad que la real. Esto se debe ya que es posible que los ecos generados en los elementos cercanos sean mayor que el eco de la discontinuidad, por lo que no es posible asegurar la profundidad exacta de la discontinuidad. En la figura 20a se muestra el escaneo de una viga de concreto, donde las esferas de poliestireno expandido de 50 mm de diámetro 1 y 2 están a una profundidad de 0.10 m; y las barras de acero A, B, C y D a una profundidad de 0.05 m. En este caso se muestra el eco de las ondas en las esferas con una flecha naranja y los ecos en los elementos cercanos con flechas negras. En la figura 20b se muestra la imagen de ultrasonido de la figura 20a, en el cual la esfera 1 y los aceros A y B aparecen como una sola mancha a una profundidad aproximada de 0.10 m, el acero C no aparece, la esfera 2 y el acero D aparecen también a una profundidad de 0.10 m aproximadamente. Como se aprecia en estas figuras, los elementos detectados están a una profundidad mayor a la real. Esto se da ya que los receptores del equipo tienen una mayor recepción de las ondas eco de los elementos cercanos que de la esfera en sí. Debido a esto, el equipo recibe una gran cantidad de ondas en un tiempo mayor por lo que el equipo muestra la discontinuidad a una profundidad mayor a la real.



(a)

(b)

Figura 20: Ecos de discontinuidad

(a) Elemento escaneado (b) Imagen de ultrasonido

2.5.3. DETECTOR DE BARRAS DE ACERO PARA CONCRETO

Un detector de metales utiliza el principio de la conductividad para ubicar barras de acero, ya que todo metal es un elemento conductor de calor o electricidad. Este dispositivo posee una serie de bobinas emisoras y receptoras. Las bobinas emisoras transmiten un flujo de corriente los cuales crean un campo electromagnético capaz de penetrar otros elementos, y las bobinas receptoras detectan la variación del campo anterior debido al efecto de un elemento metálico (BS 1881 part 204). Este efecto se debe ya que el campo magnético generado induce pequeñas corrientes eléctricas en las barras de acero, las cuales generan un propio campo magnético que provocan una corriente en el sentido de la bobina. Esta corriente es detectada por las bobinas receptoras del equipo, ya que causan un desequilibrio en su voltaje (Manual proceq profometer 2017). En la figura 21 se muestra el equipo detector de metales, en forma de carrito, el cual produce un campo magnético a través sus bobinas. Este campo induce corrientes eléctricas en la barra de acero mostrada, lo que hace que esta barra sea detectada. Como se aprecia, el campo magnético del dispositivo no es tan

grande (no abarca gran profundidad), por lo que no es posible detectar las barras que se encuentren a mayor profundidad.

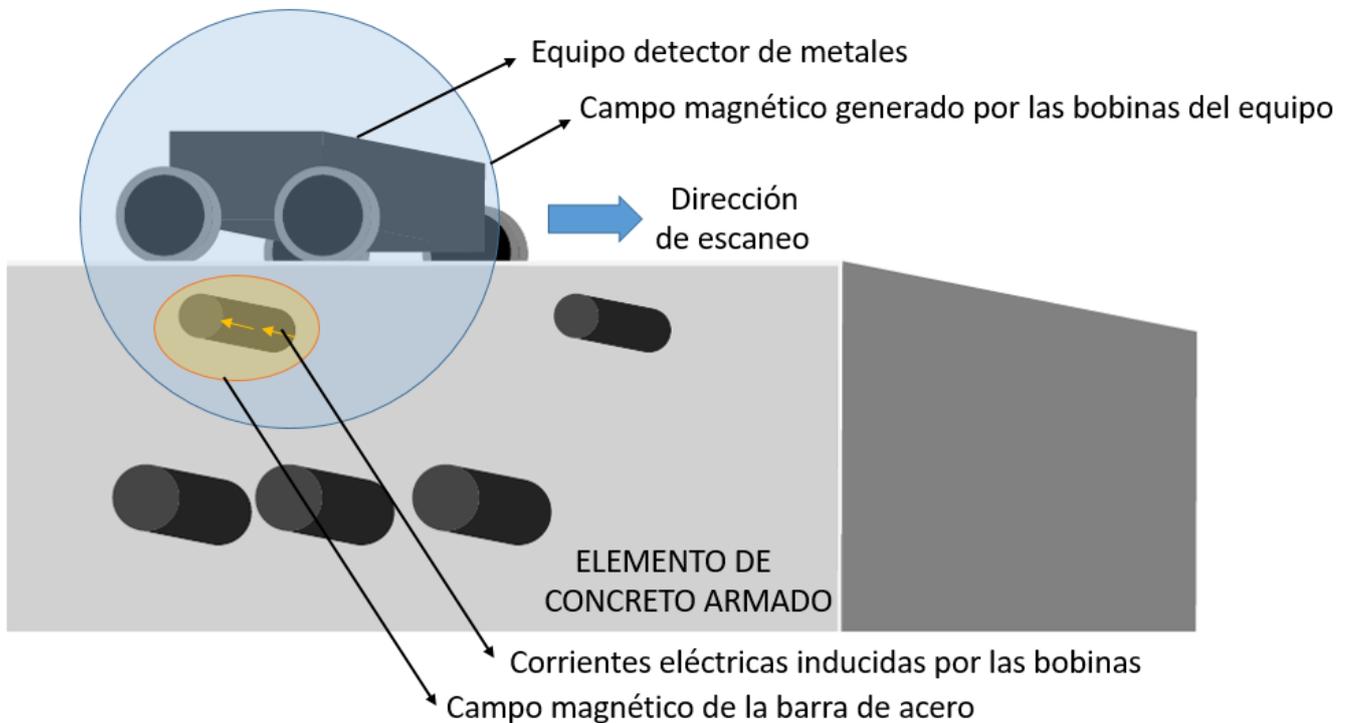


Figura 21: Función de un detector de metales.

Fuente: Adaptado del manual proceq profometer 2017

El rango de medición es la zona en la que el equipo puede detectar barras de acero, y depende del tamaño de la barra y la profundidad en la que se encuentre. En la figura 22, se muestra el rango de medición de un detector de metales Proceq, según el diámetro (tamaño de la barra) y la profundidad de la barra (profundidad de cobertura). También en esta figura se muestra la precisión de medición según la profundidad de la barra.

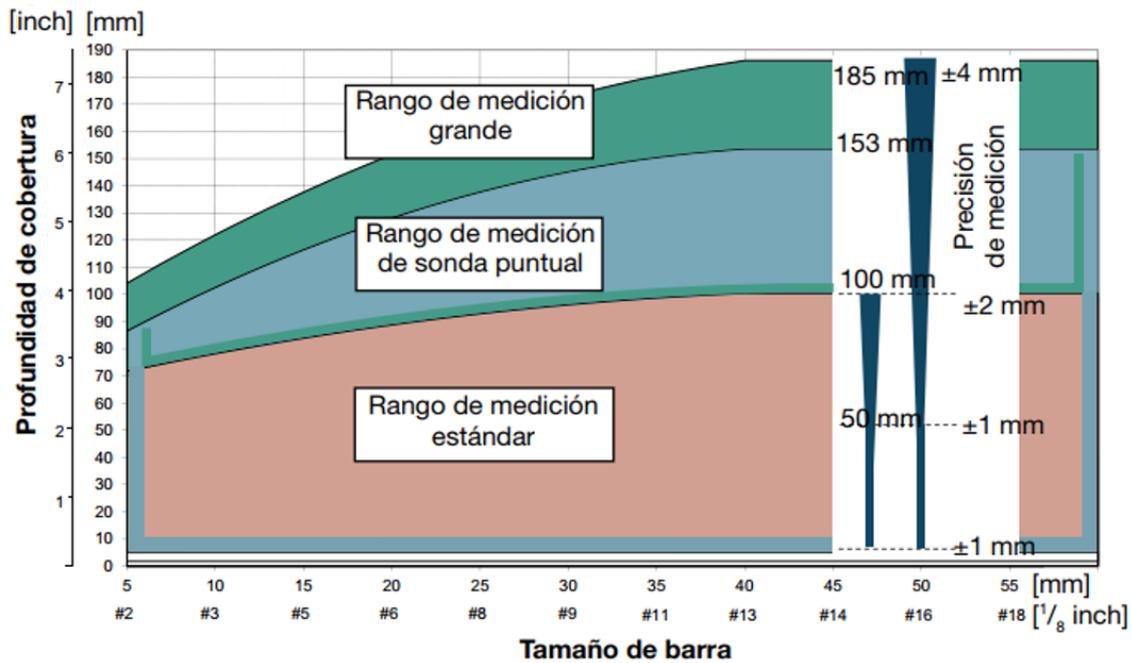


Figura 22: Cobertura de un detector de metales

Fuente: Manual proceq profometer 2017

• Escaneo de señal en franjas

El equipo permite al usuario detectar barras de acero en una franja según la intensidad o profundidad del campo magnético de las barras. En la figura 23 se muestra un escaneo de una franja de un elemento de concreto armado. En esta imagen el eje “y” muestra la intensidad del campo magnético de las barras (esta señal está escalado a 1, pero es medido en amperios) y el eje “x” la distancia longitudinal escaneada. Como se aprecia en la imagen, hay una zona de 40 mm inicial y final que no se aprecia en la señal. Esto se debe a la compensación horizontal de este equipo “Profometer 630 AI”, el cual mide 40 mm aproximadamente (la mitad del ancho del equipo). Tener en cuenta que la compensación horizontal varía dependiendo al equipo utilizado. Esta imagen se puede exportar a Excel como un vector 1 x N.

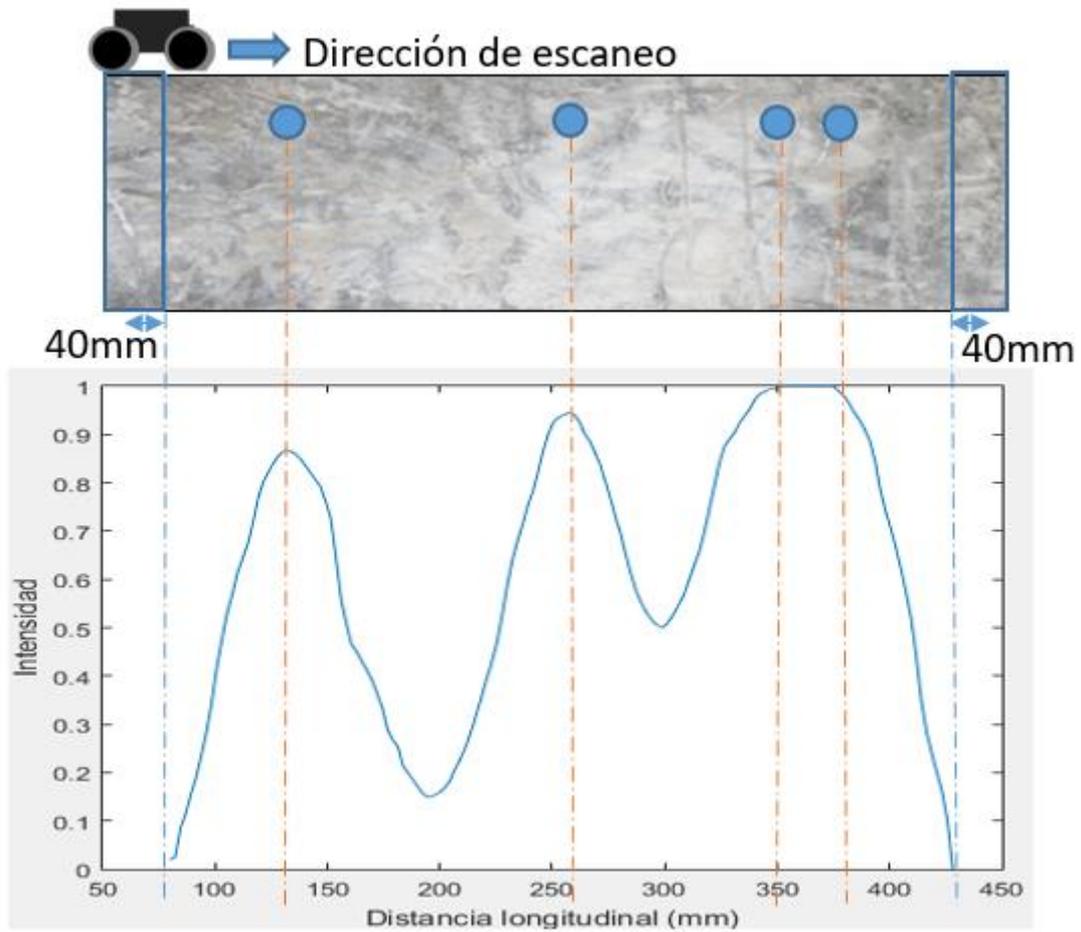


Figura 23: Escaneo en franja con un detector de metales

CAPÍTULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. MATERIALES PARA EL DESARROLLO DE LOS ENSAYOS

3.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS INSUMOS DEL CONCRETO

Se utilizó cemento de la marca SOL tipo I (ASTM C150), el cual es uno de los más consumidos en el Perú. Este cemento tenía un peso específico de 3.11 g/cm³. Por otra parte, el agregado grueso era de huso 57, con un tamaño máximo nominal de 1" y peso específico de 2760 kg/m³ (Para mayor información véase el anexo 1.01) y el agregado fino utilizado tenía un módulo de finura de 3.09 y un peso específico de 2630 kg/m³ (Para mayor información véase el anexo 1.02). Por último se utilizó el aditivo SIKAMENT 290N en una dosis de 0.7% del peso de cemento. Este aditivo mejora la resistencia mecánica, la adherencia a la armadura, durabilidad e impermeabilidad, entre otros (Para mayor información del aditivo véase la ficha técnica en el anexo 2).

3.1.2. EQUIPOS UTILIZADOS

a) EQUIPO PULSO ECO ULTRASÓNICO

Se utilizó un equipo pulso eco ultrasónico PUNDIT PL-200PE de la marca Proceq. En la figura 24 se muestra el dispositivo pulso eco (derecha) y la pantalla táctil donde se muestran las imágenes escaneadas (izquierda). Este dispositivo permite analizar elementos hasta aproximadamente 1 metro de profundidad.



Figura 24: Equipo de pulso eco (Ondas S)

Fuente: Manual proceq pundit 2017

b) EQUIPO PARA DETECTAR METALES

Se utilizó un equipo de detector de metales “Profometer 630 AI” de la marca Proceq. En la figura 25 se muestra el dispositivo detector de metales (derecha) y la pantalla táctil donde se muestran las señales escaneadas (izquierda).



Figura 25: Equipo de detector de barras de acero

Fuente: Manual proceq profometer 2017

3.2. ETAPA 1: ENSAYOS PRELIMINARES

3.2.1. PLANIFICACIÓN

Los parámetros de control se realizaron según las normas ASTM indicadas en la tabla 4. Luego, se elaboraron mezclas de concreto de prueba con el fin de que estos ensayos preliminares sirvan para elaborar el diseño de mezcla final.

Tabla 4: Parámetros de control

Parámetros de Control del concreto en estado fresco		
Asentamiento inicial	6"	ASTM C143
Contenido de aire	1% - 3%	ASTM C138
Rendimiento	0.98 – 1.02	ASTM C138
Parámetros de Control del concreto en estado endurecido		
Resistencia a compresión característica	28 días / 210 kg/cm ²	ASTM C39

Para el diseño de mezcla de prueba se utilizó una relación agua cemento de 0.7 con el cual se deseaba obtener una resistencia característica a la compresión de 210 kg/cm². El diseño de mezcla se realizó según el método de Fuller (Fuller y Thompson 1907).

3.2.2. ENSAYOS DE CONTROL

La secuencia de mezclado se realizó según lo indicado en la tabla 5. Se utilizó la mezcladora al 90% de su capacidad, con la cual por cada tanda se pudo elaborar 1 muro y 3 probetas de 6 x 12". Cada mezclado duró 5 minutos desde que se colocaron todos los insumos de la mezcla.

Tabla 5: Secuencia de mezclado

SECUENCIA DE MEZCLADO	
Material	Porcentaje
Agua (1era carga en peso)	80%
Piedra (Peso)	100%
Arena (Peso)	100%
Cemento (Peso)	100%
Agua (Final en peso)	20%
Aditivo (En volumen)	100%

Se desarrollaron 3 mezclas de prueba controladas en el laboratorio (Para mayor información de las mezclas de prueba véase el anexo 3). Con cada mezcla se elaboró un muro de diferente estilo, con el fin de buscar la mejor opción para anclar los elementos que simulan los vacíos, elegir el mejor encofrado, entre otros detalles. En la figura 26 se muestra el detalle de los 3 muros elaborados de concreto armado: M1P, M2P y M3P, los cuales son de 500 x 500 x 250 mm. En este caso los elementos internos fueron ubicados en la zona central del espesor de 250 mm. En la figura 27 se muestra la manera en que estos fueron vaciados. Como se aprecia en la figura 27a, el muro M1P contiene esferas de poliestireno

expandido de 50 mm de diámetro y fue vaciado de forma horizontal (tipo losa), ya que de esta manera era más fácil la colocación del concreto; sin embargo, se decidió cambiar el encofrado en posición vertical ya que los bloques deberían tener una compactación tipo muro. También, inicialmente se consideró utilizar esferas huecas de plástico para todos los muros, como se aprecia en la figura 27b y 27c de los muros M2P y M3P respectivamente (esferas de 3" de diámetro). Sin embargo, solo se encontraron esferas de plástico de diámetros mayores a 3" por lo que se decidió utilizar esferas de poliestireno expandido de 2" de diámetro para simular los vacíos.

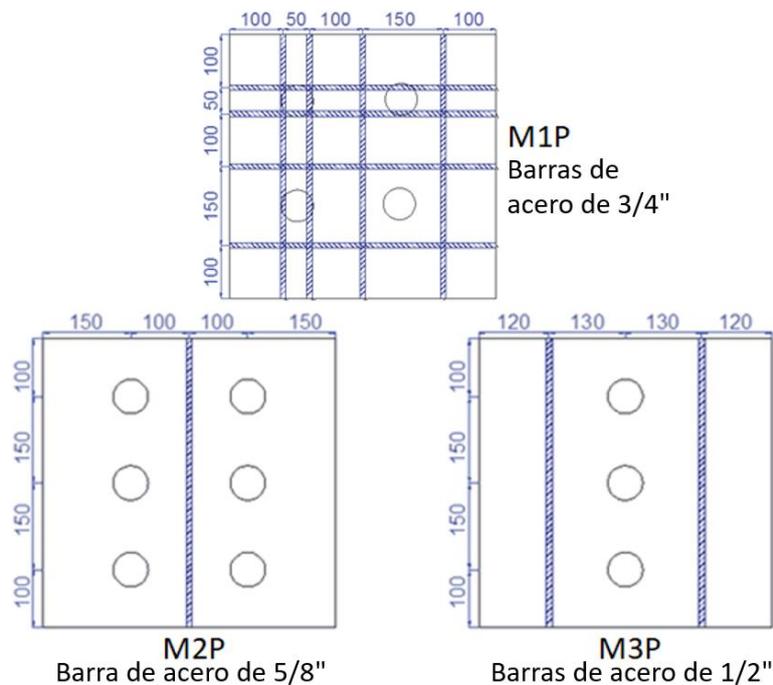


Figura 26: Muros de prueba elaborados (medidas en mm)

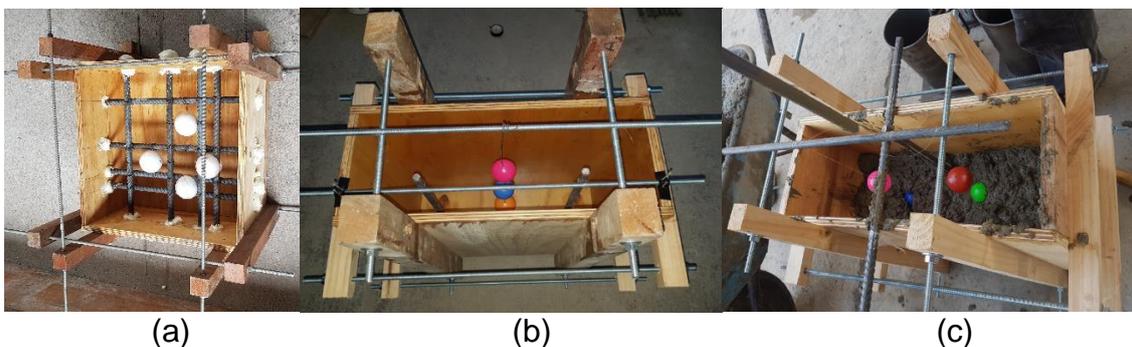


Figura 27: Muros de prueba a) M1P b) M2P c) M3P

En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de control para cada muro. En esta tabla se aprecia que en el muro M1P se obtuvo un asentamiento mayor al del parámetro de control (SLUMP), por lo que se redujo 5 litros de agua al diseño de mezcla del muro M2P y M3P manteniendo la relación agua cemento en 0.7. Por último, se aprecia que la resistencia en los ensayos a compresión a 7 días es relativamente alta, por lo que se decide incrementar la relación agua cemento a 0.75 en el diseño de mezcla final, para así tener una resistencia característica de 210 kg/cm² a los 28 días (Para mayor información del diseño de mezcla final véase el anexo 4).

Tabla 6: Ensayos de control preliminares en concreto

MURO	DIÁMETRO DE BARRAS	AIRE	SLUMP	PU(Kg/m ³)	RENDIMIENTO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (kg/cm ²) 7 días	CURADO
M1P	3/4"	1.6	8.4	2356.00	0.01	241	Cuarto de curado
M2P	5/8"	1.4	6	2340.42	0.00	254	Cuarto de curado
M3P	1/2"	2.2	6.8	2392.57	0.02	278	Cuarto de curado

3.3. ETAPA 2: ELABORACIÓN DE MUROS DE CONCRETO

3.3.1. ELEMENTOS ELABORADOS

Para empezar, se construyeron 3 encofrados de madera, con forma de muro, para lograr el vaciado de todos los elementos a elaborar. Ya construidos los encofrados, se elaboraron 15 muros de concreto armado de 500 x 500 x 200 mm acorde con la norma ASTM C192 (2014). Estos fueron divididos en tres grupos de 5 unidades, en el cual cada grupo está conformado por muros con aceros de diámetros 3/8", 1/2" o 5/8". En cada grupo se tiene dos muros del modelo 1 (T1), dos del modelo 2 (T2) y uno del modelo 3 (T3) (véase figura 28, 29 y 30). Los muros modelo 1 y 2 poseen cuatro esferas de poliestireno expandido, de 50 mm de diámetro, distribuidas en diferentes posiciones en su interior, y el modelo 3 es

un bloque patrón sin esferas. En cada muro, las esferas fueron ubicadas a una profundidad de 100 mm y la malla de acero a 50 mm del espesor de 200 mm (véase vista lateral de los figuras 28, 29 y 30). Por último, se elaboraron tres probetas cilíndricas de concreto de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura (6 x 12") por cada muro, para luego ser ensayadas a 28 días en compresión.

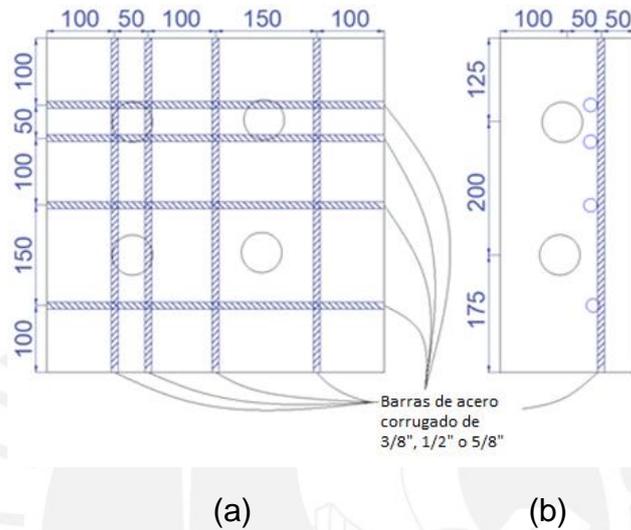


Figura 28: Modelo 1 (T1), muros de concreto armado
 (a)Vista frontal (b) Vista lateral
 Medidas en mm.

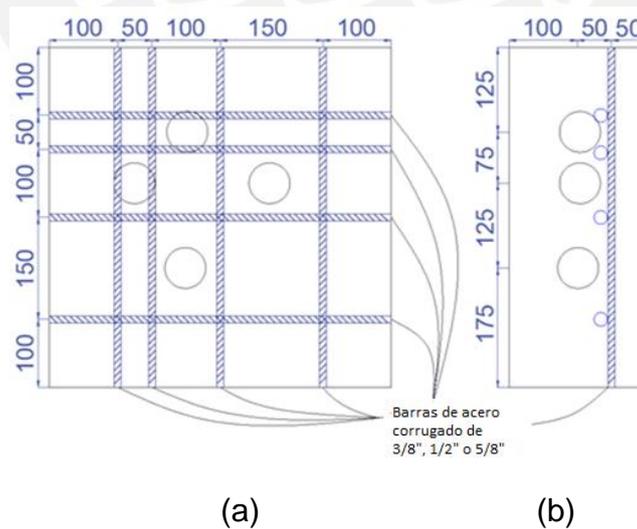
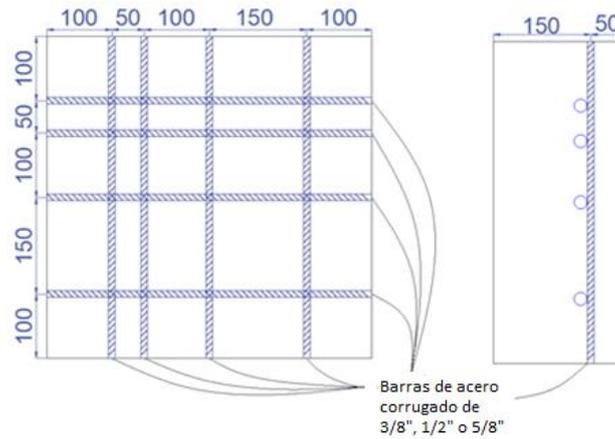


Figura 29: Modelo 2 (T2), muros de concreto armado
 (a)Vista frontal (b) Vista lateral
 Medidas en mm.



(a)

(b)

Figura 30: Modelo 3 (T3), muros de concreto armado (bloque patrón)

(a) Vista frontal (b) Vista lateral

Medidas en mm.

En las figuras 31a y 31b se muestran los encofrados de los muros modelo 1 (T1) y modelo 2 (T2) respectivamente. Como se aprecia en estas imágenes, las esferas fueron colocadas en su posición por medio de alambres, los cuales fueron tensados con una barra en la parte superior. Tener en cuenta que esta barra se encontraba fuera del interior del encofrado.



(a)

(b)

Figura 31: Elaboración de los muros (a) modelo 1 (T1) (b) modelo 2 (T2)

En la tabla 7 se muestra la fecha y hora de elaboración, las capas de concreto fresco, la compactación realizada y el tipo de curado de cada muro. El compactado se realizó tomando como Norma de referencia la ASTM C192

(2014). Para la compactación se utilizó una varilla de 5/8” de diámetro, el cual estuvo distribuido uniformemente por todo el muro, excepto en la zona por donde se encontraban las esferas, ya que existía la posibilidad de romperlas o moverlas. En la zona de esferas, cuidadosamente se compactó alrededor de estas con el fin de no dañarlas. También se realizó el compactado lateral por medio de un martillo de goma, para así evitar burbujas superficiales. El curado se realizó en una piscina con agua para todos los muros a excepción de los últimos tres, los cuales se curaron en un cuarto de curado por temas de espacio.

Tabla 7: Fecha de vaciado y compactación de cada muro

Fecha de elaboración	Muro	Hora	Capas de concreto fresco	Compactación (cantidad)		Curado
				Varillado	Por martillo de goma	
16/01/2017	M1	9-11 am	3	70	90	Piscina
	M2	12 – 2 pm				
	M3	2- 4 pm				
17/01/2017	M4	11-1 pm	3	70	90	Piscina
	M5	1-3 pm				
	M6	3-5 pm				
18/01/2017	M7	11-1 pm	3	70	90	Piscina
	M8	1-3 pm				
	M9	3-5 pm				
19/01/2017	M10	11-1 pm	3	70	90	Piscina
	M11	1-3 pm				
	M12	3-5 pm				
20/01/2017	M13	11-1 pm	3	70	90	Cuarto de curado
	M14	1-3 pm				
	M15	3-5 pm				

En la figura 32 se muestran los bloques que fueron curados en una piscina, los cuales fueron colocados uno sobre otro separados por almohadillas de neopreno. En la figura 33 se muestran los muros ya listos para ser escaneados. Tener en cuenta que cada bloque fue curado por 28 días y luego expuesto a condiciones ambientales por tres días antes de ser escaneados.

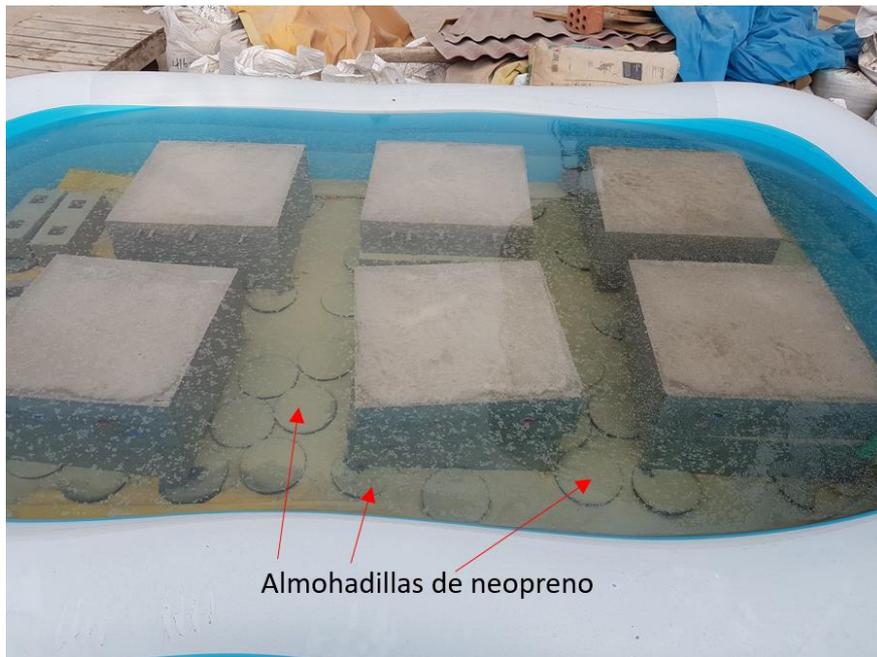


Figura 32: Curado de los muros



Figura 33: Muros elaborados

3.3.2. PROCEDIMIENTO DE ESCANEEO

Para el análisis por medio del equipo pulso eco, se escaneo cada muro en franjas de borde a borde. Los muros fueron escaneados en franjas por ambas caras de 500 x 500 mm (19.69 x 19.69 in). La cara cuando la malla de acero se encontraba a una profundidad 50 mm se denominó cara F, y la cara opuesta, cuando la malla se encontraba a una de profundidad de 150 mm, se denominó cara G. Cada cara

fue escaneada en franjas horizontales (hacia la derecha) y verticales (hacia arriba) en zonas donde se localizaban las esferas de poliestireno expandido. Los muros modelo 1 fueron escaneados en dos franjas horizontales y dos verticales, los muros modelo 2 en tres franjas horizontales y tres verticales (véase figura 34 y 35), y los muros modelo 3 fueron escaneadas de la misma manera que el modelo 1, así como el modelo 2.

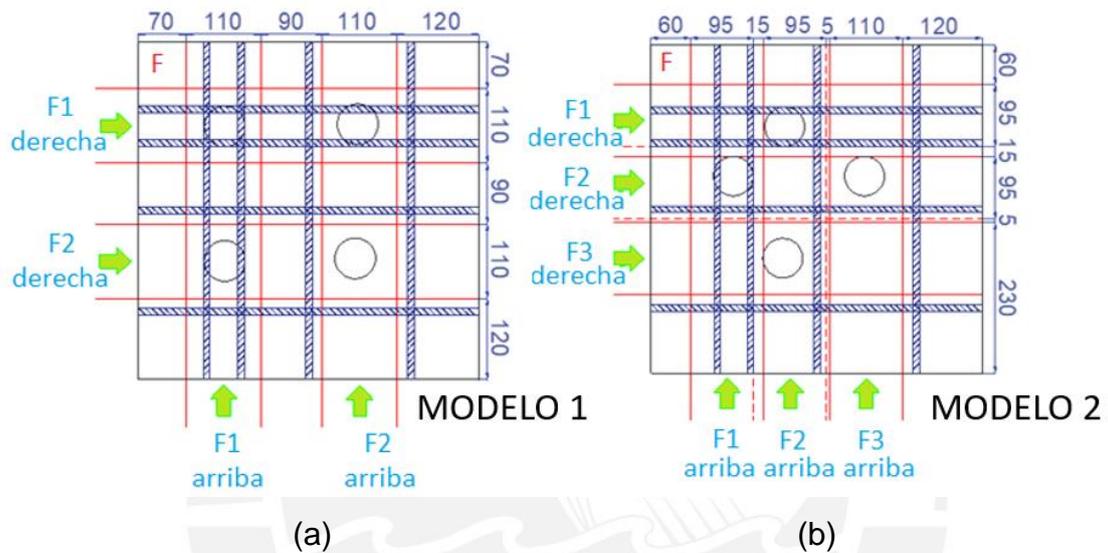


Figura 34: Escaneos horizontales y verticales en los muros – cara F
 Profundidad de la malla: 50 mm (medidas en mm)
 (a) Modelo 1 (T1) (b) Modelo 2 (T2)

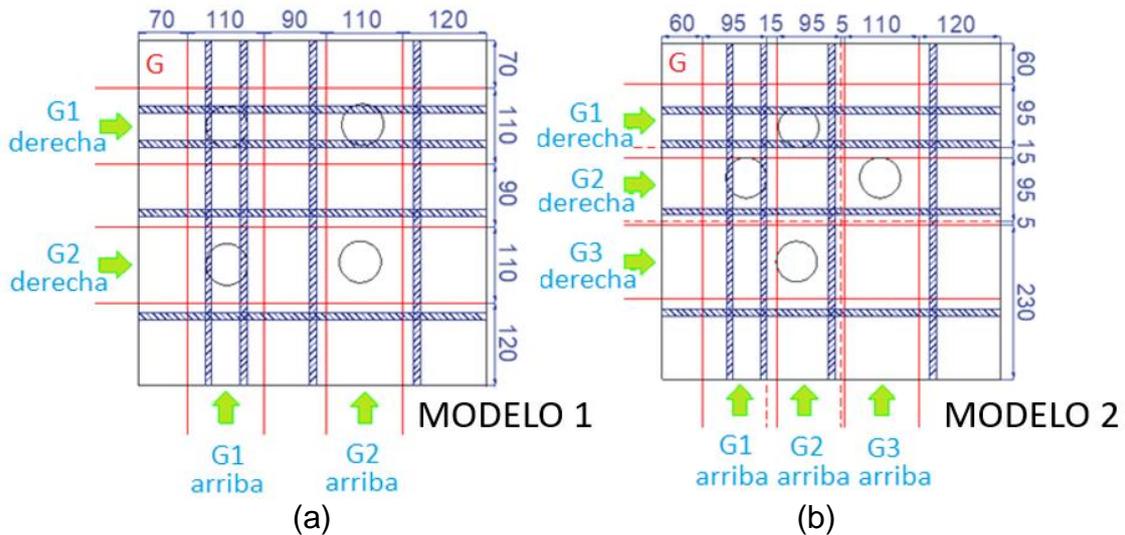


Figura 35: Escaneos horizontales y verticales en los muros – cara G
 Profundidad de la malla: 150 mm (medidas en mm)
 (a) Modelo 1 (T1) (b) Modelo 2 (T2)

Todos los escaneos fueron realizados de borde a borde, por lo que se debería sumar 80 mm al eje horizontal de todos estos escaneos. En los capítulos posteriores, todas las imágenes de ultrasonido ya están corregidas por compensación horizontal, es decir, si la franja es de 500 mm, la imagen muestra desde 80 hasta los 420 mm (sólo en el caso del equipo y el anexo 5 no está corregido por compensación horizontal).



CAPÍTULO 4: RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. ENSAYOS EN CONCRETO FRESCO Y ENDURECIDO

En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados para cada muro. Como se aprecia en esta tabla, se pudo controlar las mezclas según los parámetros de control planteados.

Tabla 8: Ensayos de control en vigas de concreto

MURO	ACERO	AIRE	SLUMP	PU (Kg/m ³)	RENDIMIENTO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (kg/cm ²) 28 días	CURADO	VELOCIDAD DE ONDA S (m/s)
M1	5/8"	2.1	6.5	20.29	1.02	276	Piscina	2138
M2	5/8"	3	6	20.36	1.02	272	Piscina	2130
M3	5/8"	2.2	6.8	20.21	1.01	248	Piscina	2183
M4	5/8"	2.5	6.2	20.30	1.02	257	Piscina	2140
M5	5/8"	2.5	7	20.16	1.01	254	Piscina	2120
M6	1/2"	2.4	6	20.37	1.02	241	Piscina	2112
M7	1/2"	2	6.5	20.15	1.01	252	Piscina	2191
M8	1/2"	2.1	6.5	20.08	1.01	271	Piscina	2122
M9	1/2"	2	6.5	20.36	1.02	246	Piscina	2092
M10	1/2"	2.1	6	20.20	1.01	261	Piscina	2150
M11	3/8"	2.5	6	20.21	1.01	262	Piscina	2180
M12	3/8"	2.2	6.5	20.34	1.02	272	Piscina	2121
M13	3/8"	1.8	6.2	20.31	1.02	257	Cuarto de curado	2166
M14	3/8"	2.6	6.5	20.25	1.02	263	Cuarto de curado	2159
M15	3/8"	2.6	6	20.29	1.02	264	Cuarto de curado	2159

También, en la tabla 8 se muestra la velocidad de onda S en cada muro elaborado. El promedio de estas velocidades es de 2144 m/s, la desviación estándar 29 m/s y el coeficiente de variación de 1.34%. En la norma ASTM C597 se indica que si un operador usa diferentes instrumentos, o si diferentes operadores utilizan el mismo instrumento deberían lograr una repetición de los resultados de la prueba con un 2% de diferencia como máximo. Si tomamos este

valor como referencia, el coeficiente de variación obtenido es menor al valor mencionado.

Además, según la tabla 8, en los ensayos en concreto fresco se obtuvo una resistencia promedio de 260 kg/cm², con una desviación estándar de 14.8 kg/cm² y un coeficiente de variación de 5.7%. Este concreto puede categorizarse como un concreto de muy buena calidad según el ACI 214R (2011, véase tabla 9).

Tabla 9: Dispersión del concreto

DISPERSIÓN TOTAL					
CLASE DE OPERACIÓN	DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA DIFERENTES GRADOS DE CONTROL (Kg/cm ²)				
	EXCELENTE	MUY BUENO	BUENO	SUFICIENTE	DEFICIENTE
Concreto en Obra	< a 28.1	28.1 a 35.2	35.2 a 42.2	42.2 a 49.2	> a 49.2
Concreto en Laboratorio	< a 14.1	14.1 a 17.6	17.6 a 21.1	21.1 a 24.6	> a 24.6

4.2. RESULTADOS DE LAS IMÁGENES PULSO ECO (ONDAS S)

Todos los escaneos realizados con el equipo de ultrasonido en los muros elaborados se adjuntan en el anexo 5 en Excel. Cada escaneo de este resumen tiene un comentario acerca de los elementos detectados y de los que no fueron detectados. Tener en cuenta que estas son imágenes del equipo, por lo que se le debe sumar la compensación horizontal inicial.

4.2.1. INFLUENCIA DEL ACERO TRANSVERSAL

En ocasiones el acero transversal a la franja escaneada aparece como manchas en el escaneo, la cual puede ser confundida como un vacío u otro material si no se tiene la certeza que es una barra de acero. Por ejemplo en la figura 36a se muestra una franja escaneada de un muro modelo 3 con barras de acero de 1/2” de diámetro. En la figura 36b se aprecia el corte M – M de la figura 36a y en la figura 36c el escaneo de ultrasonido de la franja. En este caso el acero

transversal (1, 2, 3 y 4) a la franja escaneada aparece en la imagen como manchas (figura 36c). También, en este caso se observa que los aceros transversales 3 y 4, separados 50 mm, aparecen como una sola mancha en la imagen de ultrasonido.

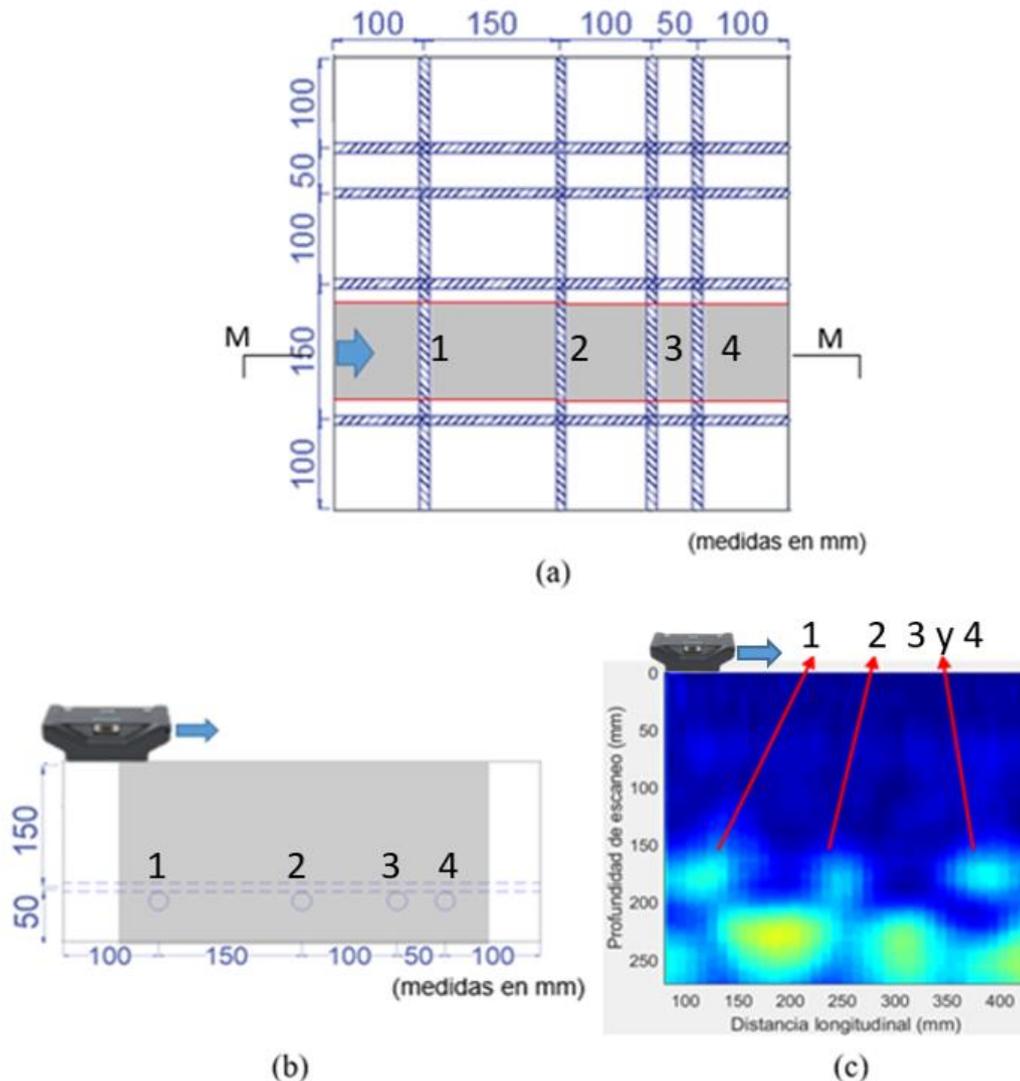


Figura 36: Influencia del acero transversal (M10 G2 arriba T1 – barras de 1/2")

(a) Vista frontal (b) Vista corte M-M (c) Escaneo de ultrasonido

Por otro lado, en la figura 37 se muestra otro ejemplo de una franja escaneada en el cual el muro es del modelo 2 con barras de 1/2" de diámetro. En la figura 37a se muestra la franja escaneada, en la 37b el corte N – N, y en la 37c el

escaneo de ultrasonido. En el escaneo la esfera aparece como una abertura al final del espesor escaneado, los aceros transversales 1 y 2 se muestran como una sola mancha, el acero transversal 3 aparece tenuemente y el cuarto es casi imperceptible. Como se aprecia en esta imagen los aceros se muestran a una profundidad de 110 mm y no de 50 mm, por lo que se deduce que lo que se ve en la imagen son los ecos generados por los aceros.

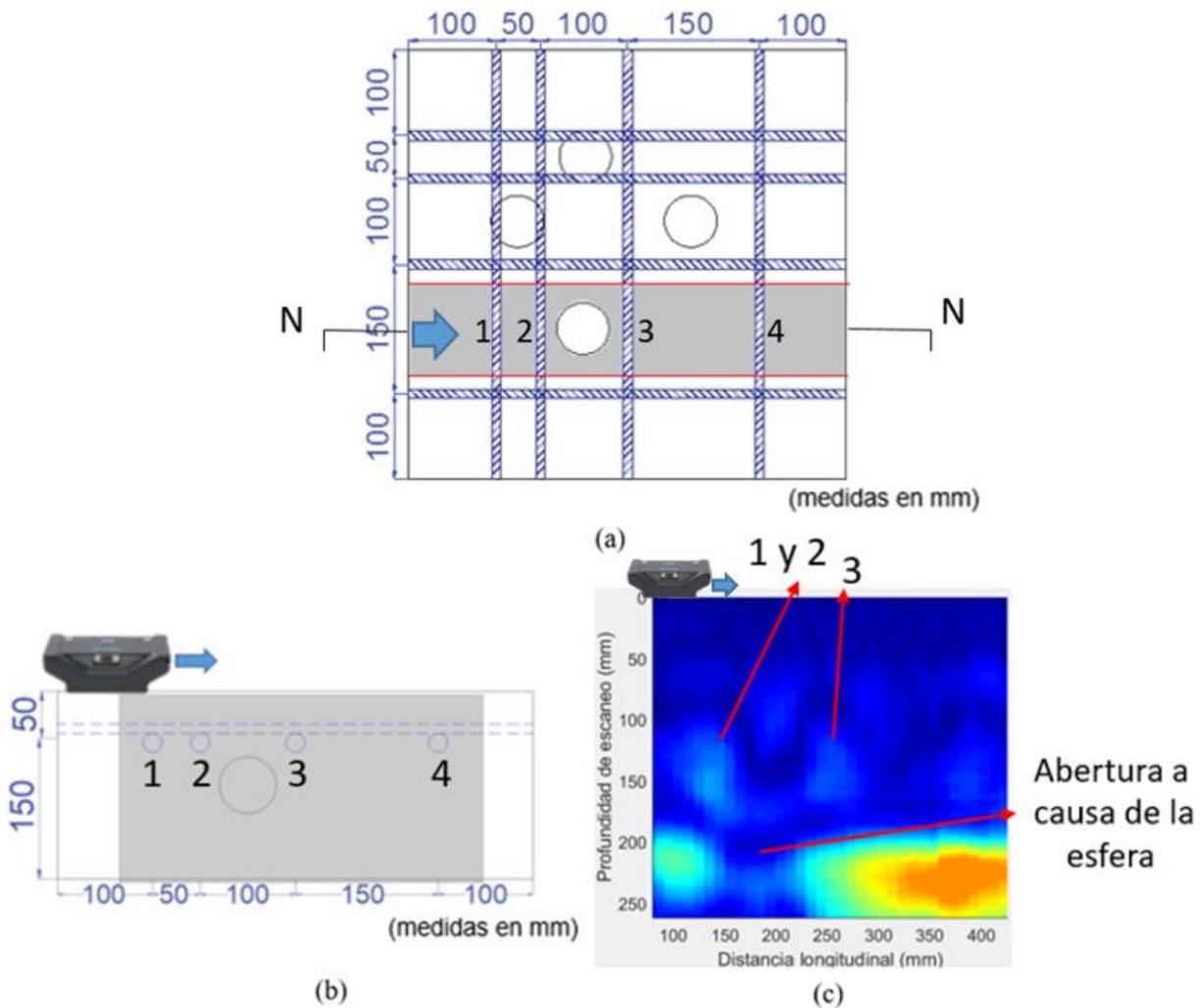


Figura 37: Influencia del acero transversal (M9 F3 derecha – barras de 1/2")

(a) Vista frontal (b) Vista corte M-M (c) Escaneo de ultrasonido

En la figura 38 se muestra un escaneo de una franja de un muro modelo 1 con barras de 3/8" de diámetro. En el escaneo se muestra que la 1era esfera con las

barras 1 y 2 aparecen como una única mancha, por lo que no se puede distinguir si solo es la esfera, o si solo son las barras o una combinación entre estas. También, las barras 3 y 4 no aparecen en el escaneo y la 2da esfera aparece como una mancha.

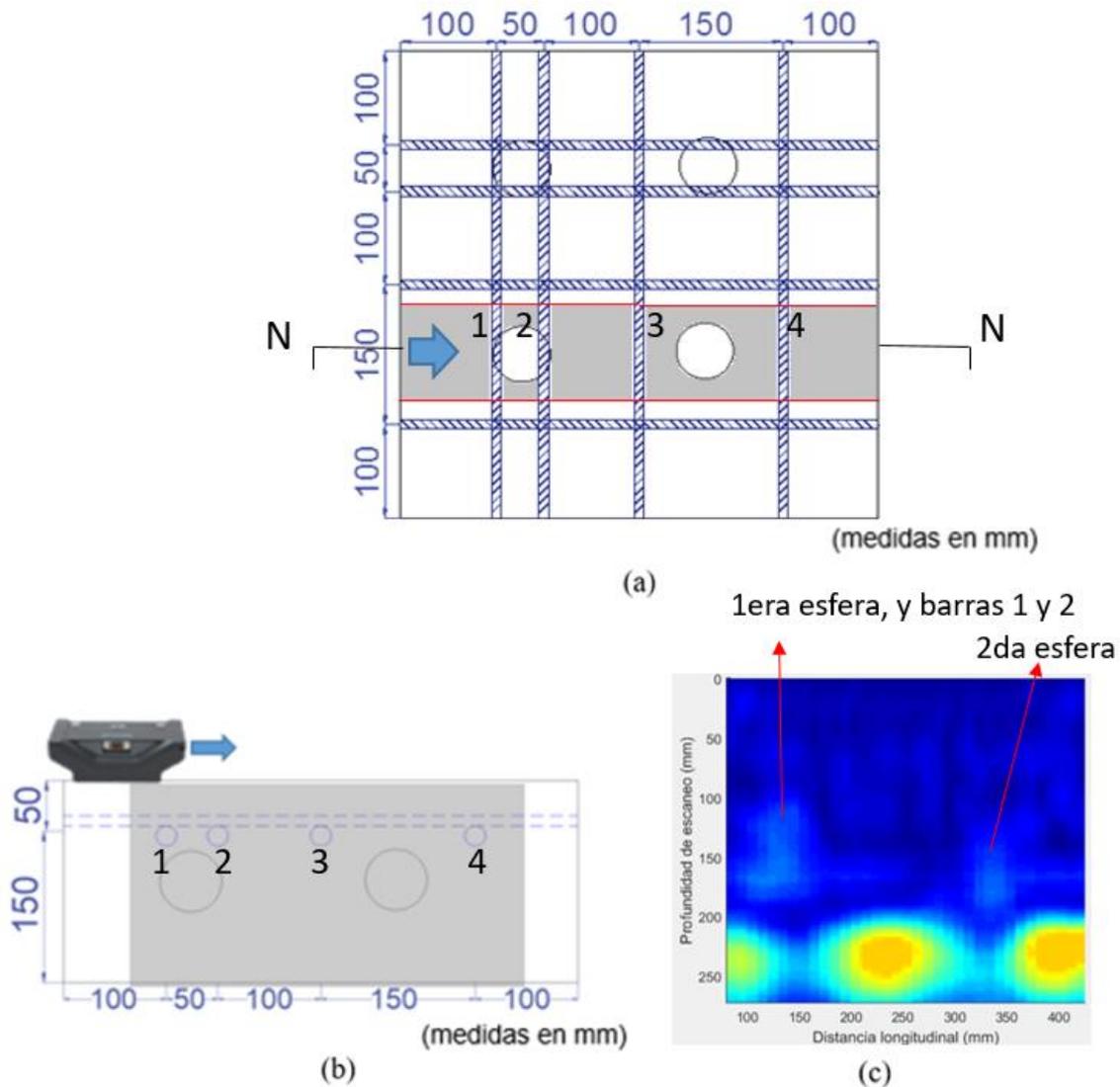


Figura 38: Influencia del acero transversal (M11 F2 derecha – barras de 3/8")

(a) Vista frontal (b) Vista corte M-M (c) Escaneo de ultrasonido

En la tabla 10 se muestra la influencia del acero transversal, es decir, cuantas veces apareció en las imágenes de ultrasonido. Tener en cuenta que para este análisis no se han considerado los aceros transversales separados 50 mm, ya

que estos suelen aparecer como una sola mancha en la imagen (como el caso de la figura 37). En esta tabla se aprecia que los aceros transversales no son detectados al 100% y además, cuando estos aceros son de menor diámetro, la posibilidad de detectarlos es menor.

Tabla 10: Influencia del acero transversal

TIPO	INFLUENCIA DEL ACERO TRANSVERSAL		
	ENCONTRADOS	TOTAL	INFLUENCIA (%)
ACERO 5/8"	30	48	62.5
ACERO 1/2"	20	48	41.7
ACERO 3/8"	17	48	35.4

En la tabla 11, se muestra el porcentaje de influencia de los aceros transversales encontrados de la tabla 10, cuando estos se encuentran a 50 o 150 mm de profundidad. En esta tabla se aprecia que cuando los aceros transversales se encuentran a 150 mm de profundidad, la probabilidad de detección con un equipo de ultrasonido es mayor que cuando se encuentran a 50 mm.

Tabla 11: Influencia del acero transversal encontrado según su profundidad

TIPO	INFLUENCIA DEL ACERO TRANSVERSAL ENCONTRADO	
	Profundidad de 50 mm (cara F)	Profundidad de 150 mm (cara G)
ACERO 5/8"	40.0%	60.0%
ACERO 1/2"	15.0%	85.0%
ACERO 3/8"	11.8%	88.2%

4.2.2. INFLUENCIA DEL ACERO LONGITUDINAL

a) Barras de acero separados 50 mm

Cuando los aceros están en la misma dirección que la franja escaneada, estos pueden aparecer como una mancha continua o en fragmentos, por lo que es complicado distinguir si hay un vacío u otro elemento por dentro de la franja analizada. En la figura 39 se muestra un ejemplo de como se aprecia el acero longitudinal, paralelo a la dirección del escaneo, cuando dos barras se

encuentran separadas 50 mm. En este caso el muro es del modelo 1 con barras de 5/8" de diámetro. Como se aprecia en esta imagen, las dos barras aparecen como una mancha continua a 150 mm de profundidad, lo que hace muy difícil distinguir otros elementos en este escaneo.

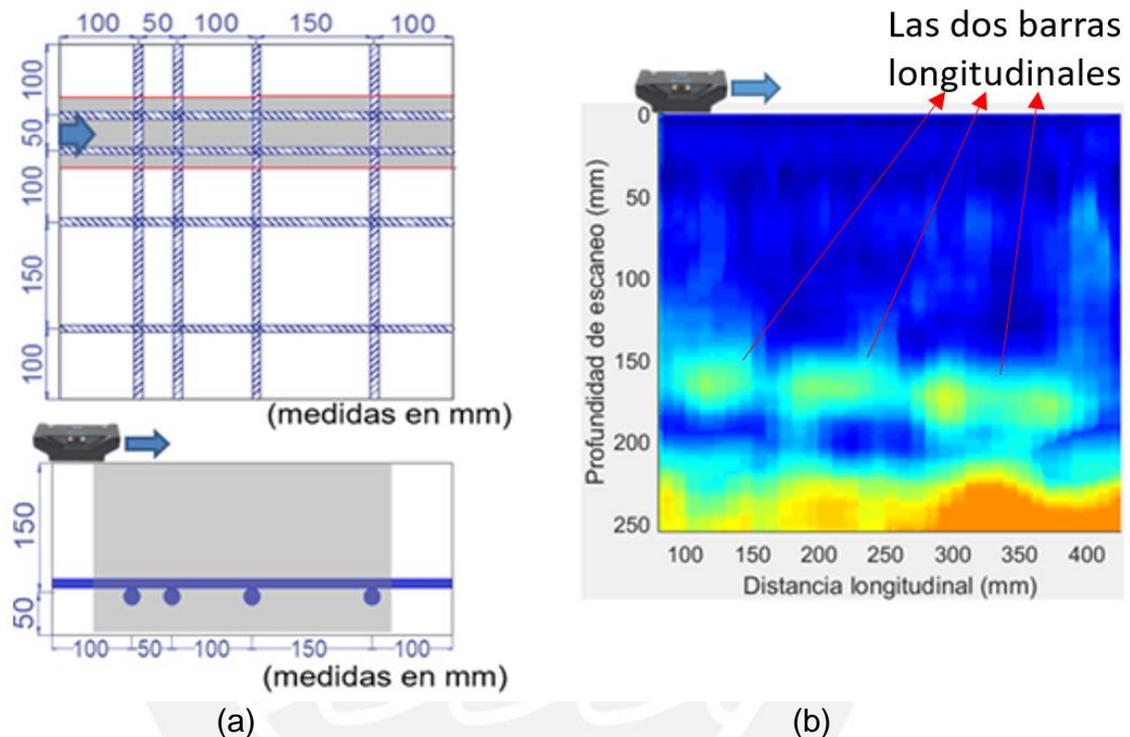


Figura 39: Influencia de los aceros longitudinales separados 50 mm
(M5G1 derecha T1 – barras de 5/8")

(a) Elemento escaneado (b) Escaneo de ultrasonido

En la tabla 12 se muestra la influencia de los aceros longitudinales (aceros con la misma dirección del escaneo) cuando se encuentran separados 50 mm. En este caso se tomó como barras encontradas cuando estos aparecían en el escaneo como fragmentos tenues o una mancha continua. En la tabla 12 se aprecia que cuando los aceros longitudinales son de mayor diámetro la influencia de estos es mayor en los escaneos, sin embargo, cuando los aceros son de 3/8" de diámetro la influencia es nula.

Tabla 12: Influencia de los aceros longitudinales distanciados 50 mm

TIPO	INFLUENCIA DEL ACERO LONGITUDINAL (distanciados 50 mm)		
	INFLUENCIA	TOTAL	INFLUENCIA (%)
ACERO 5/8"	19	24	79.2
ACERO 1/2"	13	24	54.2
ACERO 3/8"	0	24	0.0

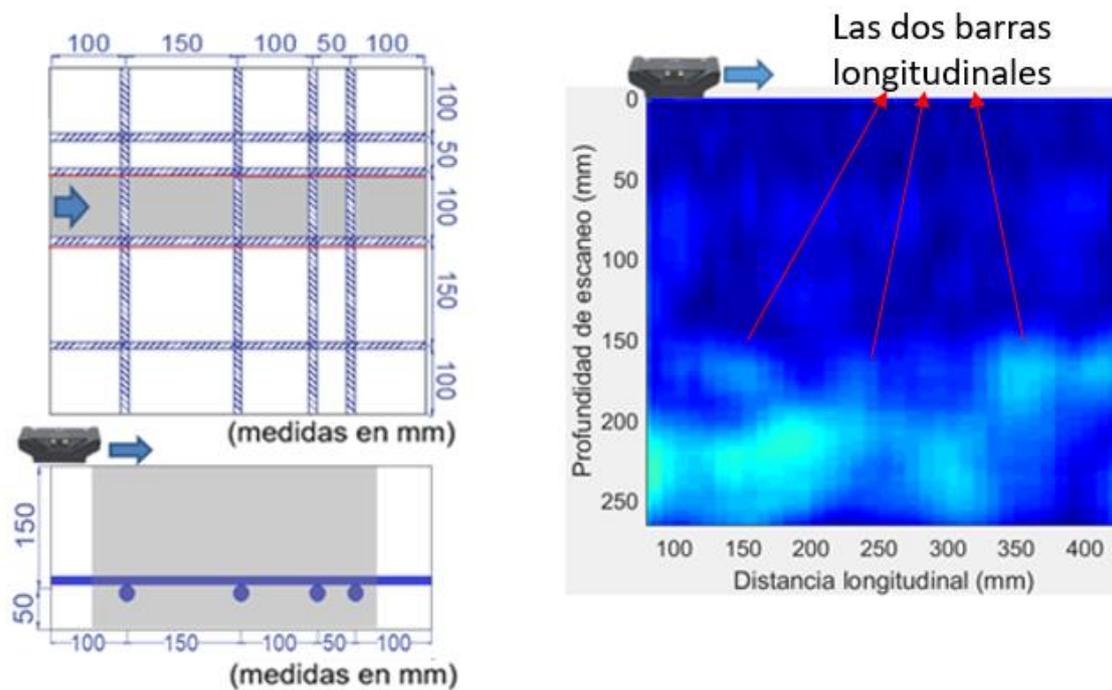
En la tabla 13 se muestra el porcentaje de influencia en profundidad de los aceros que fueron encontrados de la tabla 12. En la tabla 13 se deduce que la influencia de los aceros longitudinales no depende si están a una profundidad de 50 mm o 150 mm, ya que los valores son muy cercanos.

Tabla 13: Influencia de los aceros longitudinales encontrados según su profundidad

TIPO	INFLUENCIA DEL ACERO LONGITUDINAL (distanciados 50 mm)	
	Profundidad de 50 mm (cara F)	Profundidad de 150 mm (cara G)
ACERO 5/8"	52.6%	47.4%
ACERO 1/2"	46.2%	53.8%
ACERO 3/8"	-	-

a) Barras de acero separados 100 mm

Por otro lado, en la figura 40 se muestra el caso de acero longitudinal, paralelo a la dirección del escaneo, cuando dos barras se encuentran separadas 100 mm. En este ejemplo el muro es del modelo 2 con barras de 5/8" de diámetro. Como se aprecia en esta imagen, las dos barras aparecen como una mancha de menor intensidad que las barras separadas 50 mm. A pesar que esta mancha continua es tenue, aún se puede cometer el error de indicar que estas son cangrejeras o elementos internos si es que no se tiene la seguridad que son barras de acero.



(a)

(b)

Figura 40: Influencia de los aceros longitudinales separados 100 mm

(M5G2 arriba T2 – barras de 5/8")

(a) Elemento escaneado (b) Escaneo de ultrasonido

En la tabla 14 se muestra la influencia de los aceros longitudinales (aceros con la misma dirección del escaneo) cuando se encuentran separados 100 mm. De las tablas 12 y 14, se aprecia que la influencia del acero longitudinal en porcentaje es mayor cuando estos se encuentran distanciados 50 mm que cuando se encuentran distanciados 100 mm. La razón de esto puede ser debido a que la franja escaneada tiene aproximadamente 110 mm de ancho, y cuando los aceros están distanciados 100 mm, estos se encuentran casi a los extremos de la franja escaneada. En la tabla 14, al igual que en la tabla 12, la influencia del acero longitudinal es menor cuando el diámetro del acero es más pequeño y además, que la influencia de los aceros longitudinales de 3/8" de diámetro también es nula.

Tabla 14: Influencia de los aceros longitudinales distanciados 100 mm

INFLUENCIA DEL ACERO LONGITUDINAL (distanciados 100 mm)			
TIPO	INFLUENCIA	TOTAL	INFLUENCIA (%)
ACERO 5/8"	9	12	75.0
ACERO 1/2"	4	12	33.3
ACERO 3/8"	0	12	0.0

En la tabla 15 se muestra el porcentaje de influencia en profundidad de los aceros que fueron encontrados en la tabla 14. En la tabla 15, al igual que en la tabla 13, se deduce que la influencia de los aceros longitudinales no depende si están a una profundidad de 50 mm o 150 mm.

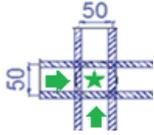
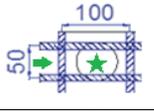
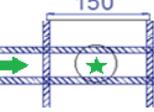
Tabla 15: Influencia de los aceros longitudinales encontrados según su profundidad

INFLUENCIA DEL ACERO LONGITUDINAL (distanciados 100 mm)		
TIPO	Profundidad de 50 mm (cara F)	Profundidad de 150 mm (cara G)
ACERO 5/8"	55.6%	44.4%
ACERO 1/2"	50.0%	50.0%
ACERO 3/8"	-	-

4.2.3. ESFERAS ENCONTRADAS

En las siguientes tablas se muestra el porcentaje de esferas detectadas según la distribución de los aceros a su alrededor (las flechas indican la dirección del escaneo). En la tabla 16 se aprecia el porcentaje de esferas detectadas entre aceros distanciados 50 mm (1.97 in), con la misma dirección del escaneo; y como se vio anteriormente, la influencia del acero con la misma dirección del escaneo es considerable, por lo que la posibilidad de ubicar elementos internos en franjas de este tipo es baja. Tener en cuenta que el porcentaje obtenido en la tabla 16 es referencial, ya que para este análisis, las manchas que se consideró como esferas detectadas tienen parte del efecto de las barras de acero.

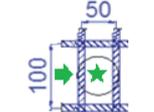
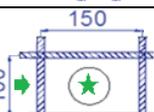
Tabla 16: Probabilidad referencial al detectar esferas entre barras longitudinales separadas 50 mm

TIPO	ACERO 5/8"			ACERO 1/2"			ACERO 3/8"		
	ENCONT.	TOTAL	PROBAB.	ENCONT.	TOTAL	PROBAB.	ENCONT.	TOTAL	PROBAB.
	2	8	25%	3	8	38%	3	8	38%
	6	8	75%	7	8	88%	4	8	75%
	2	8	25%	2	8	25%	6	8	50%

Medidas en mm

En la tabla 17 se muestra el porcentaje de esferas detectadas entre aceros separadas 100 mm (1.97 in), con la misma dirección del escaneo; y como en el caso anterior, la influencia del acero con la misma dirección del escaneo es considerable, por lo que la posibilidad de ubicar elementos internos en franjas de este tipo es baja. Al igual que en la tabla 16, el porcentaje obtenido en la tabla 17 es referencial, debido a que las manchas que se consideró como esferas detectadas pueden tener parte del efecto de las barras de acero.

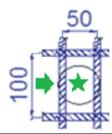
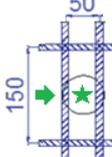
Tabla 17: Probabilidad referencial al detectar esferas entre barras longitudinales separadas 100 mm

TIPO	ACERO 5/8"			ACERO 1/2"			ACERO 3/8"		
	ENCONT.	TOTAL	PROBAB.	ENCONT.	TOTAL	PROBAB.	ENCONT.	TOTAL	PROBAB.
	0	8	100%	7	8	88%	8	8	100%
	8	8	100%	5	8	63%	7	8	88%

Medidas en mm

Por otra parte, en la tabla 18 se muestra la probabilidad de detectar esferas entre barras transversales a la dirección del escaneo separadas 50 mm. En este tipo de escaneos, la esfera y las dos barras de acero aparecían como una única mancha, por lo que no es posible precisar si se detectó únicamente la esfera. También de la tabla 18 se aprecia que a pesar de encontrarse estos tres elementos muy cercanos, estos no aparecen siempre al 100%.

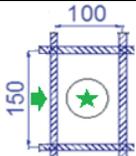
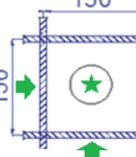
Tabla 18: Detección de esfera con barras transversales separadas 50 mm

TIPO	ACERO 5/8"			ACERO 1/2"			ACERO 3/8"		
	ENCONT.	TOTAL	PROBAB.	ENCONT.	TOTAL	PROBAB.	ENCONT.	TOTAL	PROBAB.
	8	8	100%	7	8	88%	8	8	100%
	7	8	88%	8	8	100%	8	8	100%

Medidas en mm

En la tabla 19 se muestra la probabilidad de detectar esferas cuando estas se encuentran entre aceros con la misma dirección del escaneo, espaciados mayor o igual a 150 mm; y que estén entre aceros transversales distanciados mayor o igual a 100 mm. En esta tabla se aprecia que la confiabilidad de detección de una esfera de 50 mm de diámetro es alta, ya que el acero a su alrededor está muy alejado, por lo que su influencia es nula. También se muestra que la probabilidad de ubicar una esfera de 50 mm no es del 100%.

Tabla 19: Detección de esferas ubicadas entre barras alejadas más de 100 mm

TIPO	ACERO 5/8"			ACERO 1/2"			ACERO 3/8"		
	ENCONT.	TOTAL	PROBAB.	ENCONT.	TOTAL	PROBAB.	ENCONT.	TOTAL	PROBAB.
	7	8	88%	6	8	75%	6	8	75%
	7	8	88%	6	8	75%	7	8	88%
TOTAL	14	16	88%	12	16	75%	13	16	81%

Medidas en mm

En la tabla 20 se muestra la probabilidad de detectar esferas de 50 mm de diámetro. Para este análisis solo se han considerado las esferas detectadas de la tabla 19.

Tabla 20: Esferas detectadas

ESFERAS DETECTADAS		
ENCONTRADAS	TOTAL	PROBABILIDAD (%)
39	48	81.25

CAPÍTULO 5: PROCESAMIENTO DE SEÑALES PARA ELIMINAR EL ACERO TRANSVERSAL DE LAS IMÁGENES DE ULTRASONIDO

Como se apreció en las tablas anteriores, el acero incide en gran parte en los escaneos realizados con un equipo pulso eco ultrasónico, por lo que se desarrolló un procesamiento de imágenes con el fin de desaparecer o minimizar al máximo la interferencia del acero transversal a la línea de escaneo. Para esto, se escanearon todos los muros, en su cara F, por medio de un detector de metales, en las mismas franjas escaneadas con el equipo pulso eco ultrasónico. El objetivo fue de utilizar la señal del detector de metales como un filtro empírico experimental en la imagen de ultrasonido. No se escaneó la cara G, ya que en esta la profundidad de la malla de acero es de 150 mm, el cual está fuera del rango del detector de metales utilizado.

5.1. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL DEL DETECTOR DE METALES

Cada escaneo en franja realizado con el equipo pulso eco ultrasónico, de borde a borde, tiene una compensación horizontal de 80 mm inicial y final. Sin embargo, en el caso del detector de metales en un escaneo de franja se tiene una compensación horizontal de 40 mm inicial y final. En la figura 41a se muestra un escaneo en franja de 500 mm de un elemento de concreto armado con un detector de metales, en el cual el eje “y” es la variación del campo magnético debido a las barras de acero escalada a 1, y el eje “x”, la longitud de la franja escaneada. En este caso, las barras colocadas son del mismo diámetro, sin embargo, las intensidades generadas por las dos primeras barras transversales no son completamente iguales, y además, las dos últimas barras se encuentran muy cercanas, lo que hizo que sus intensidades se superpongan y no dejen que la intensidad entre ellos sea cero. También, se apreció que la señal tenía algo

de ruido, por lo que lo ideal sería suavizarla. El escaneo de línea única se puede exportar en Excel como una columna $1 \times N_1$, para luego exportarlo en Matlab.

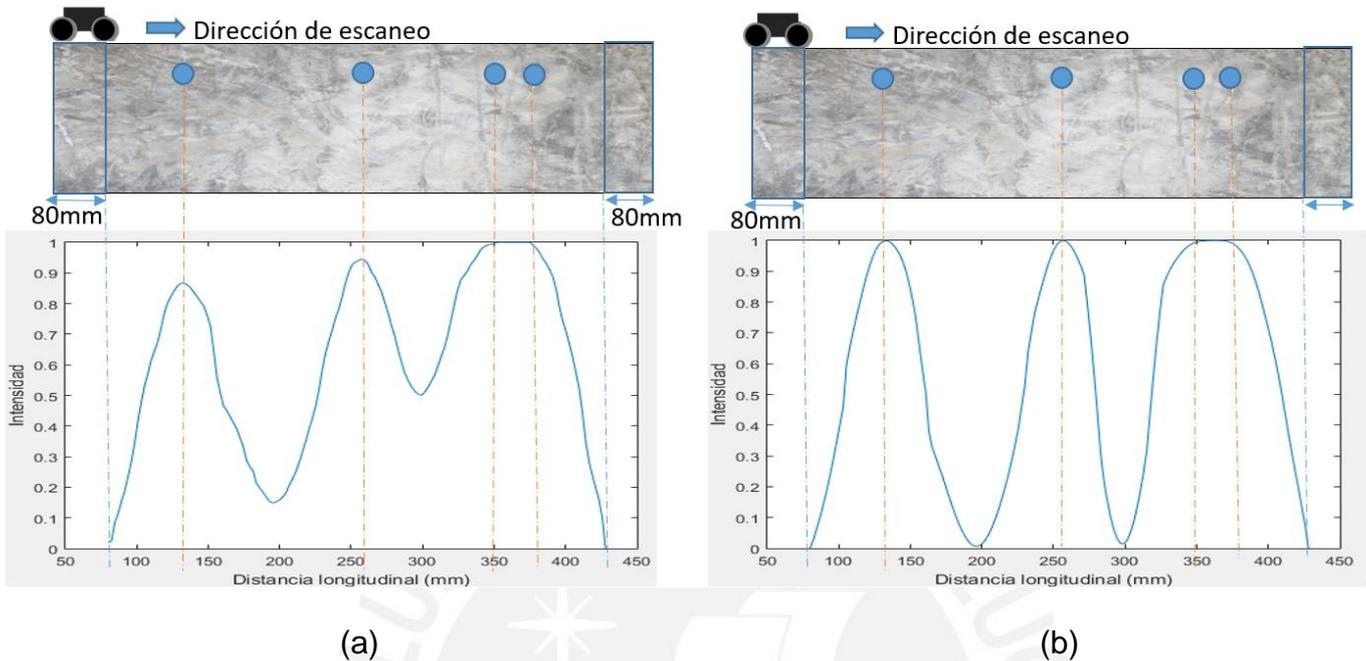


Figura 41: Señal del detector de metales en MATLAB

(a) Sin procesar (b) procesado

La señal del detector de metales se procesa en una serie de pasos antes de utilizarlo. Primero, para poder filtrar la imagen de ultrasonido con la del detector de metales, se necesita que ambos tengan la misma distancia longitudinal. Como se mencionó, los escaneos se realizaron de borde a borde, por lo que se recortó la señal del detector de metales 40 mm a cada lado para que así tenga la misma distancia longitudinal que la imagen de ultrasonido (80 mm de compensación horizontal). En la figura 41a se muestra la señal ya recortada, en el cual la señal inicia desde los 80 mm y culmina a los 420 mm. Segundo, la señal del detector de metales tiene un pequeño ruido, como se aprecia en la figura 41a, el cual se suavizó con un filtro promedio lineal del tipo: (0.2 0.2 0.2 0.2 0.2). Tercero, los picos de la señal poseen diferente amplitud (por efectos del diámetro, grado de oxidación, profundidad de la barra, entre otros), y también que cuando los aceros

transversales se encuentran muy cerca, estos picos se superponen y no dejan que la intensidad entre ellos sea cero. Entonces, por medio de Matlab se incrementó estos picos máximos a 1, si eran mayores a 0.3, y se redujo los picos mínimos a 0, si eran menores de 0.7 (Este valor puede ser cambiado dependiendo a la experiencia del operador, sin embargo se recomienda 0.3 y 0.7). De este modo se obtuvo una nueva señal como vector $1 \times N$. En la figura 41b se aprecia la señal ya procesada de la figura 41a.

5.2. PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN DEL PULSO ECO ULTRASÓNICO

Primero, la imagen se guardó en escala de grises como una imagen jpg o png. Segundo, esta imagen se cargó en Matlab y se convirtió nuevamente en escala de grises para evitar cualquier error posterior (intensidad de escala de grises: 0 a 255). Debido a esto, la imagen de cinco dimensiones (imagen a color) se redujo a tres, es decir a una matriz $A \times B$, en el cual cada elemento de la matriz tenía un valor entre 0 y 255 (intensidad de color de grises). Segundo, la imagen $A \times B$ se escaló de tal manera que tenga la misma longitud de la señal del detector de metales, es decir, que B sea igual a N. Debido a esto, ahora se tiene una imagen $M \times N$. Tercero, la intensidad de la matriz se escaló de [0, 255] a [0, 1]. Finalmente, esta nueva matriz se mostró en Matlab en un mapa de colores tipo “jet” con una intensidad de [0, 1.5] (Si es necesario, el usuario puede cambiar este valor de 1.5). En la figura 42a se muestra la imagen de ultrasonido original del equipo (5 dimensiones), en la 42b la imagen ya en escala de grises (3 dimensiones) y en la 42c la imagen 42b graficada en un mapa de colores “jet” (3 dimensiones).

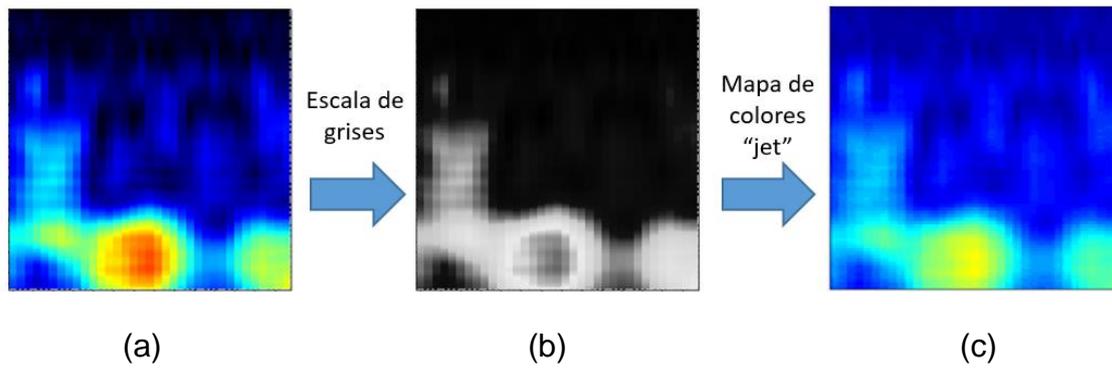
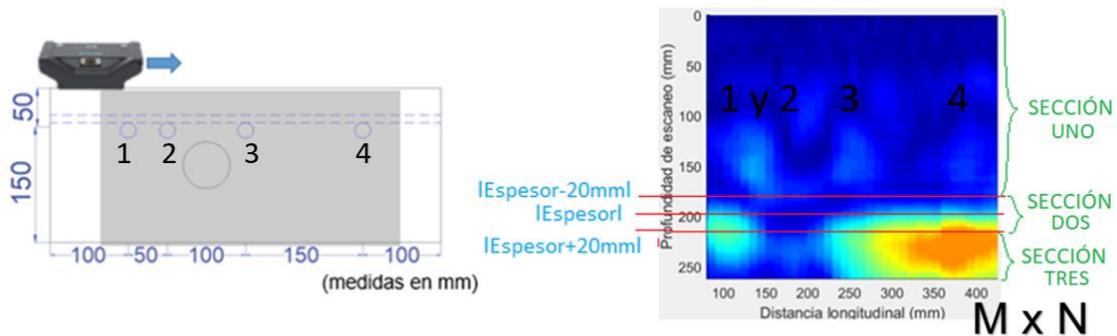


Figura 42: Señal del detector de metales en MATLAB

- (a) Imagen de ultrasonido del equipo (b) Imagen en escala de grises
 (c) Imagen en mapa de colores “Jet” en MATLAB

Cada imagen de ultrasonido $M \times N$ se dividió en tres secciones de filas con el fin de aplicar un filtro en cada una de ellas. La sección uno está conformado desde la primera fila hasta la fila donde se encuentre el “Espesor – 20 mm”, la sección dos desde la fila “Espesor – 20 mm” hasta “Espesor + 20 mm”, y la sección tres de la fila “Espesor + 20 mm” hasta la última fila. En la figura 43a se muestra el escaneo de un elemento de concreto de 200 mm de espesor, y en la figura 43b la imagen obtenida del escaneo, en el cual se muestra las 3 secciones mencionadas en la imagen de ultrasonido $M \times N$ (este fue graficado en MATLAB en colormap: “jet”). En el caso de este ejemplo, la sección uno está conformada desde la fila 1 hasta la fila donde se tenga una profundidad de 180 mm; la sección dos, desde la fila de profundidad 180 mm hasta 220 mm; y la sección tres desde 220 mm hasta la fila final de la imagen de ultrasonido.



(a)

(b)

Figura 43: Separación en bloques del escaneo (M9F3 derecha)

(a) Elemento escaneado (b) Imagen de ultrasonido

5.3. FILTRADO DE LA IMAGEN DE ULTRASONIDO

Para el filtrado de las imágenes de ultrasonido se utilizaron dos filtros. Para la sección uno se utilizó el filtro 1; para la sección tres, el filtro 2; y para la sección dos, una combinación del filtro 1 y 2. Para entender de mejor manera estos filtros, se utilizará el ejemplo de la figura 44. En la figura 44a se muestra la vista frontal del elemento de concreto; en la 44b, el corte N-N del elemento de concreto; en la 44c, la señal procesada del detector de metales de la franja escaneada de la figura 44a; y en la 44d la imagen de ultrasonido. En este caso se aprecia en la imagen de ultrasonido que las barras transversales 1 y 2 aparecen como una sola mancha, la esfera deja una abertura en el espesor final (no aparece como mancha), la barra 3 aparece como otra mancha y la barra 4 no es detectada.

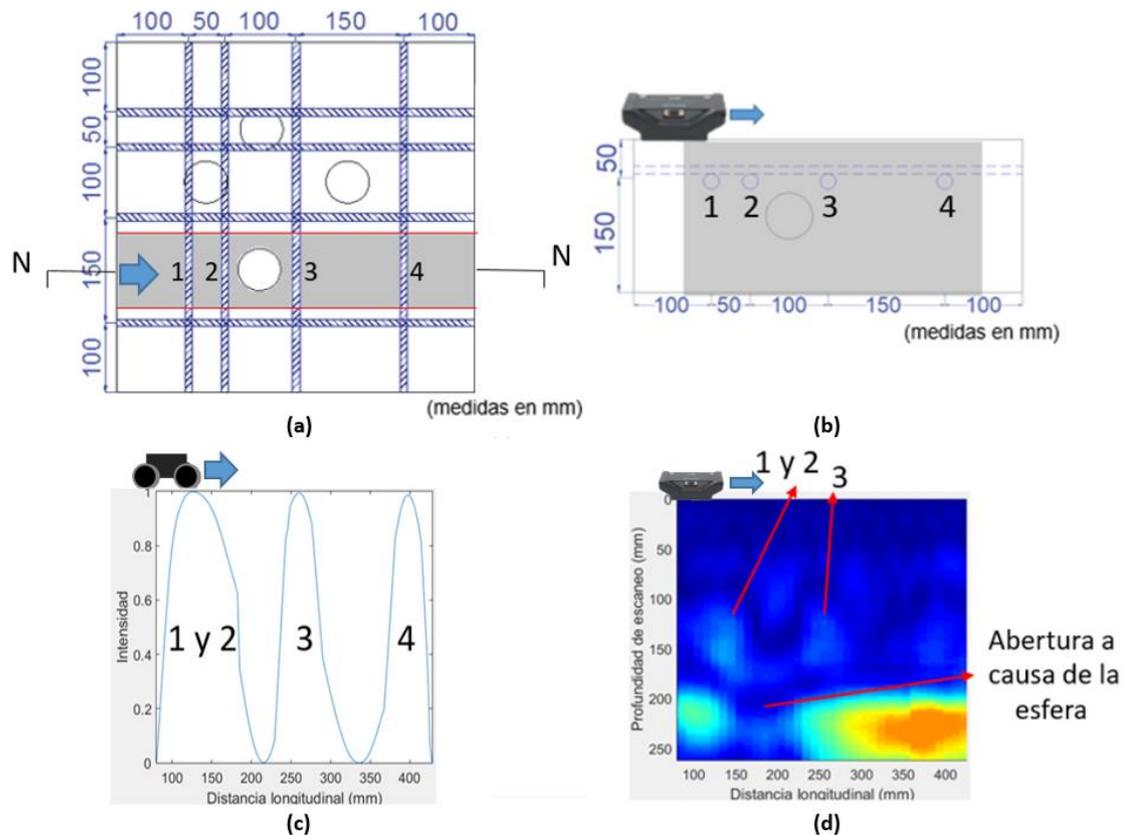


Figura 44: Escaneo M9F3 derecha (barras de 1/2")

(a) Vista frontal del elemento escaneado (b) Corte N-N

(c) Señal del detector de metales obtenida (d) Imagen de ultrasonido

a) Filtro 1: sección uno

Este filtro reduce las manchas dejadas por las barras de acero transversales de la imagen de ultrasonido. Para ello, cada fila "1 x N", "2 x N", ..., "[Espesor - 20 mm] x N" es dividido por el vector 1 x N del detector de metales. De este modo la intensidad de las manchas de acero, si es que hubiese, se reducen considerablemente. En la figura 45a se muestra la imagen de ultrasonido antes de ser procesada y en la 45b se aprecia la imagen de ultrasonido con el filtro aplicado, el cual desapareció las manchas dejadas por las barras transversales 1, 2 y 3.

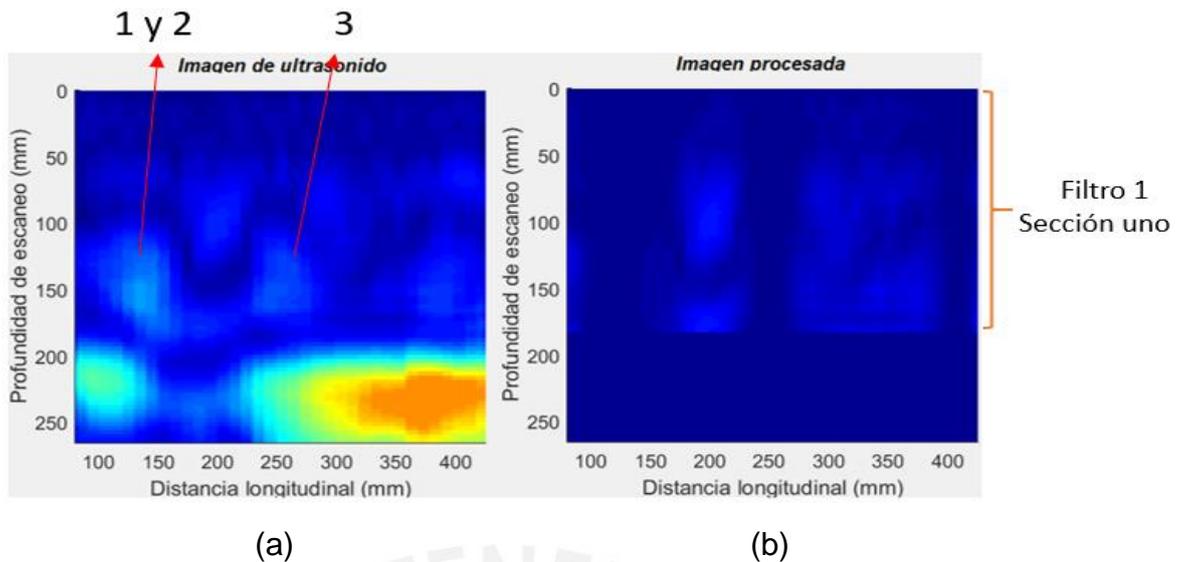
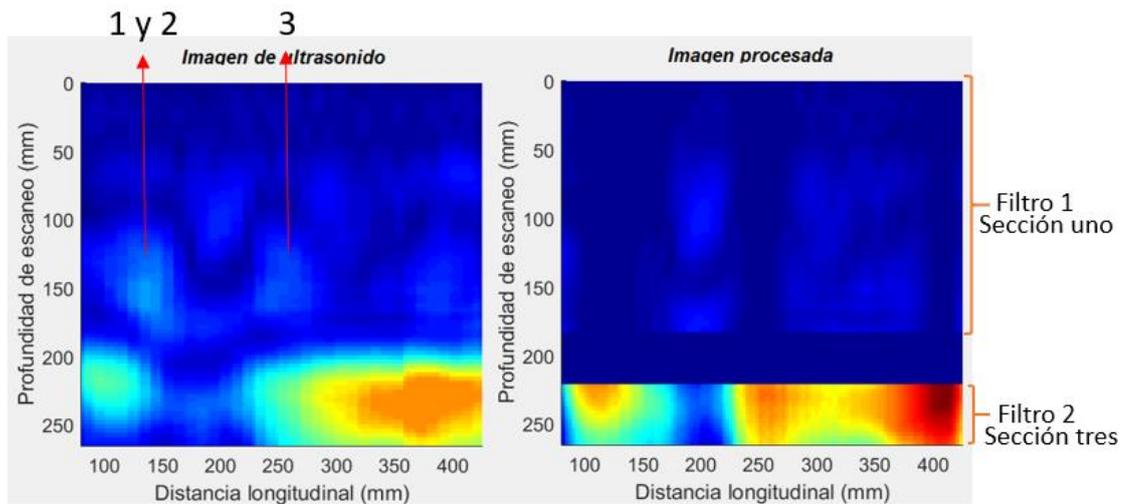


Figura 45: Filtro 1 – sección uno (M9F3 derecha)

(a) Imagen de ultrasonido (b) Imagen procesada sección uno

b) Filtro 2: sección tres

Este filtro rellena las aberturas dejadas por el acero en el espesor escaneado de la imagen de ultrasonido. Para ello, cada fila “ $|\text{Espesor} + 20 \text{ mm}| \times N$ ”, “ $|\text{Espesor} + 20 \text{ mm} + 1| \times N$ ”, ..., “ $M \times N$ ” es multiplicado por el vector “ $1 \times N$ ” del detector de metales. De este modo la intensidad de las sombras de acero en la imagen de ultrasonido, si es que hubiese, se incrementa considerablemente. En la figura 46a se muestra la imagen obtenida con el equipo y en la figura 46b, la imagen ya procesada en las secciones uno y tres. Como se aprecia el filtro 2 ha rellenado las aberturas ocasionadas por las barras de acero transversales, sin embargo, aún se muestra una abertura el cual se deduce que es la sombra de la esfera.



(a)

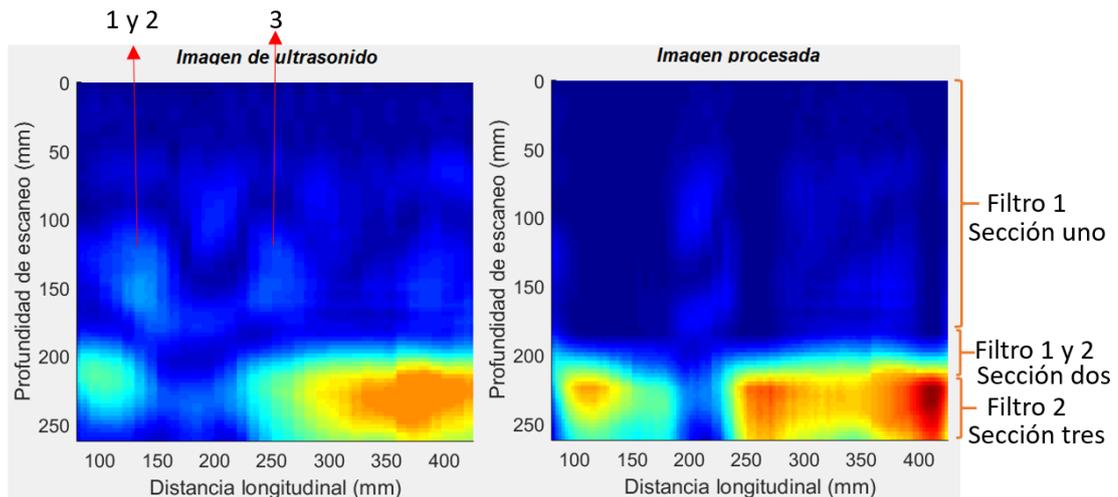
(b)

Figura 46: Filtro 2 - sección tres (M9F3 derecha)

(a) Imagen de ultrasonido (b) Imagen procesada sección 1 y 3

c) Filtro 1 y 2: sección dos

Para evitar efectos de borde o de frontera en la imagen de ultrasonido, se realiza una combinación lineal de los filtros 1 y 2 entre las filas “|Espesor – 20 mm|” y “|Espesor + 20 mm|”. En la figura 47a se muestra la imagen obtenida con el equipo y en la figura 47b, la imagen ya procesada completamente. Como se aprecia en esta imagen, en la sección dos se le ha aplicado una combinación del filtro 1 y 2 para que exista una continuidad entre la sección uno y tres. Tener en cuenta que al realizar estos filtros se ha perdido su naturaleza inicial y el resultado final es solo de visualización.



(a)

(b)

Figura 47: Filtro 1 y 2 – sección dos (M9F3 derecha)

(a) Imagen de ultrasonido (b) Imagen procesada sección 1, 2 y 3

En la figura 47b se muestra la imagen de ultrasonido sin las manchas y aberturas de las barras acero y solo se aprecia la abertura dejada por la esfera de 50 mm de diámetro.

En la figura 48 se muestra otro ejemplo de un escaneo. En la figura 48a se muestra la vista frontal del elemento de concreto; en la 48b, el corte N-N del elemento de concreto; en la 48c, la señal procesada del detector de metales de la franja escaneada de la figura 48a; en la 48d la imagen de ultrasonido sin procesar; y la 48e la imagen ya procesada. En la figura 48d aparecen las barras 1 y 2 con la esfera como una sola mancha, las barras 3 y 4 no aparecen, y la 2da esfera se muestra como una abertura. En la figura 48e se muestra que las barras 1 y 2 desaparecen completamente y solo se muestra la 1era esfera, como la abertura de la 2da esfera. Por último, en el anexo 6 se adjunta todos los procesamientos de imágenes realizados de los muros elaborados.

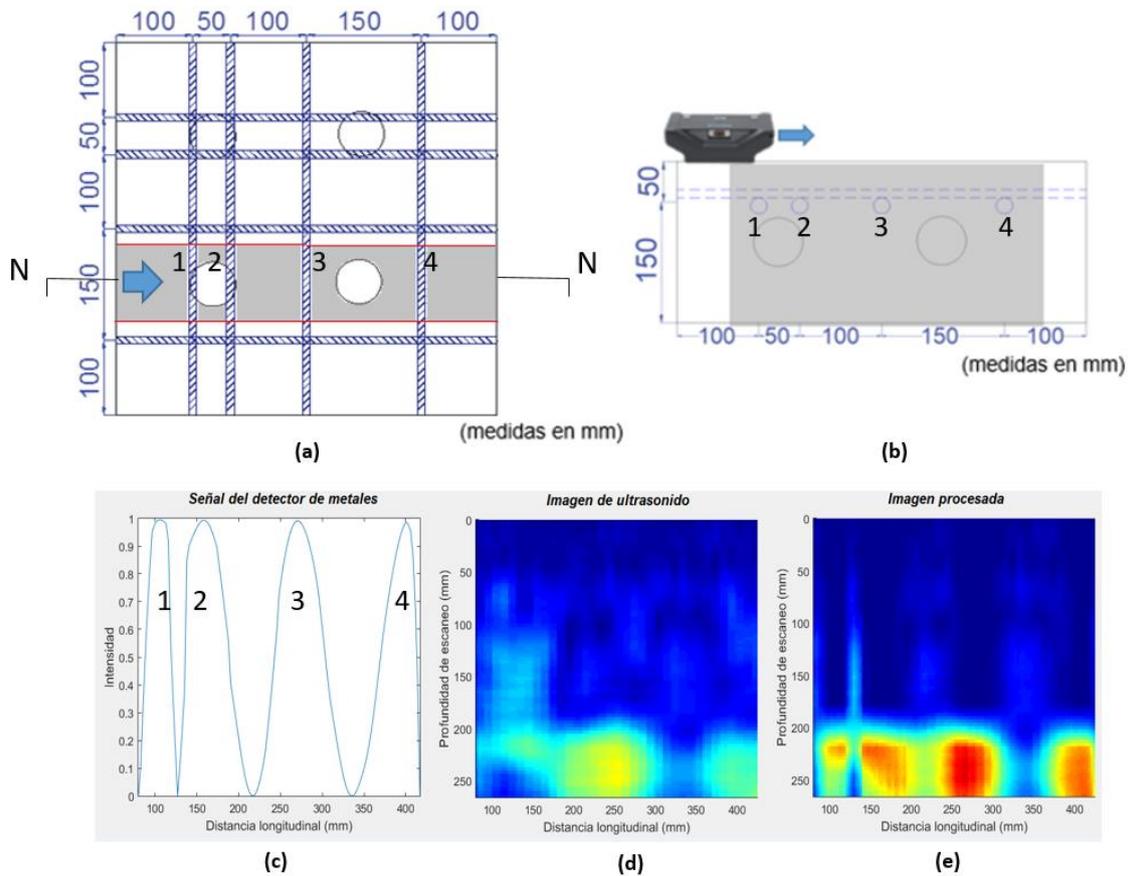


Figura 48: Escaneo M2F2 derecha (barras de 5/8")
 (a) Vista frontal del elemento escaneado (b) Corte N-N
 (c) Señal del detector de metales obtenida
 (d) Imagen de ultrasonido sin procesar (e) Imagen de ultrasonido procesada

5.4. INTERFAZ DEL PROGRAMA

Se realizó una interfaz del programa, en el cual se ingresa la compensación horizontal, inicial y final, de la señal del detector de metales y de la imagen de ultrasonido (ya que las compensaciones son muy diferentes en otros equipos). Luego se coloca la distancia longitudinal escaneada de ambos equipos (sin compensación horizontal) y la profundidad de la imagen de ultrasonido. Después se carga la señal del detector de metales de Excel y después la imagen de ultrasonido. Por último se ingresa el espesor del elemento escaneado y con estos datos la imagen de ultrasonido es procesada en una nueva imagen con un efecto

mínimo o nulo de los aceros transversales. En la figura 49 se muestra la interfaz del programa en MATLAB.

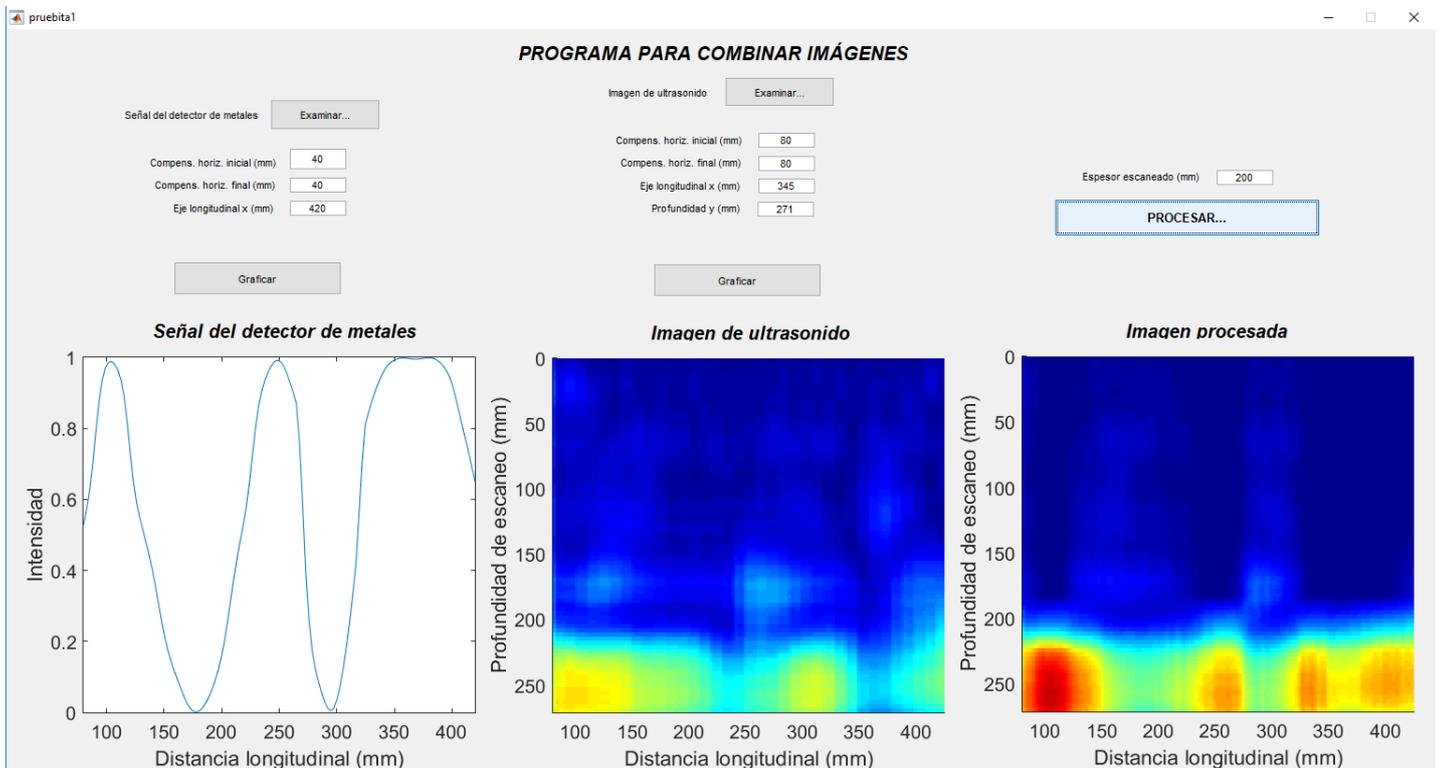


Figura 49: Interfaz del programa

5.5. APLICACIÓN DEL PROGRAMA EN OBRA

5.5.1. PUENTE EN CAJAMARCA

Se realizó el escaneo de los arranques de un puente en Cajamarca, el cual se encontraba en construcción (véase figura 50). En este caso se quería verificar si existían cangrejeras internas en los elementos de concreto.



(a)

(b)

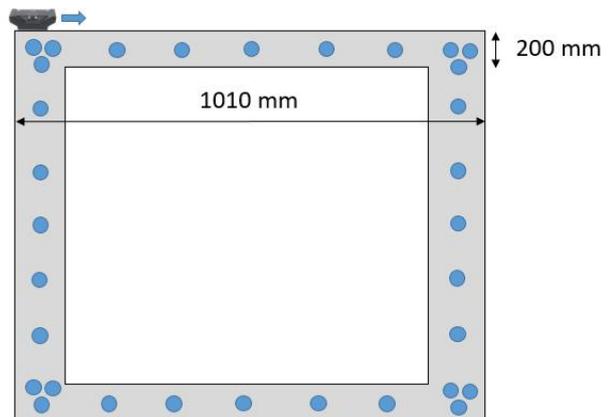
Figura 50: Imágenes del puente en construcción

(a) Encofrado del puente (b) Arranques del puente

El escaneo se realizó en las cuatro caras de cada arranque por medio del equipo pulso eco ultrasónico y del equipo detector de metales. En la figura 51 se muestra la cara superior de uno de los arranques, el cual tiene 1010 mm de longitud escaneada y 200 mm de espesor.



(a)



(b)

Figura 51: Escaneo superior de arranque del puente

(a) Vista superior del puente (b) Vista frontal referencial del escaneo

En la figura 52a se muestra la señal del detector de metales obtenida al escanear la franja de la figura 51; en la 52b la imagen de ultrasonido obtenida; y en la 52c la imagen ya procesada. En esta última imagen se aprecia que se ha podido

eliminar casi completamente las manchas ocasionadas por las barras de acero. Sin embargo, al rellenar las sombras dejadas por los aceros, se aprecian zonas que no fueron rellenadas completamente (véase en la imagen los círculo rojos), por lo que se deduce que es probable que existan elementos internos o vacíos en el elemento de concreto. Sin embargo, al revisar nuevamente los elementos de concreto se verificó que en ciertos puntos se ubicaban separadores de concreto atados a los aceros, por lo que es posible que estas dos sombras se hayan dado a causa de un separador.

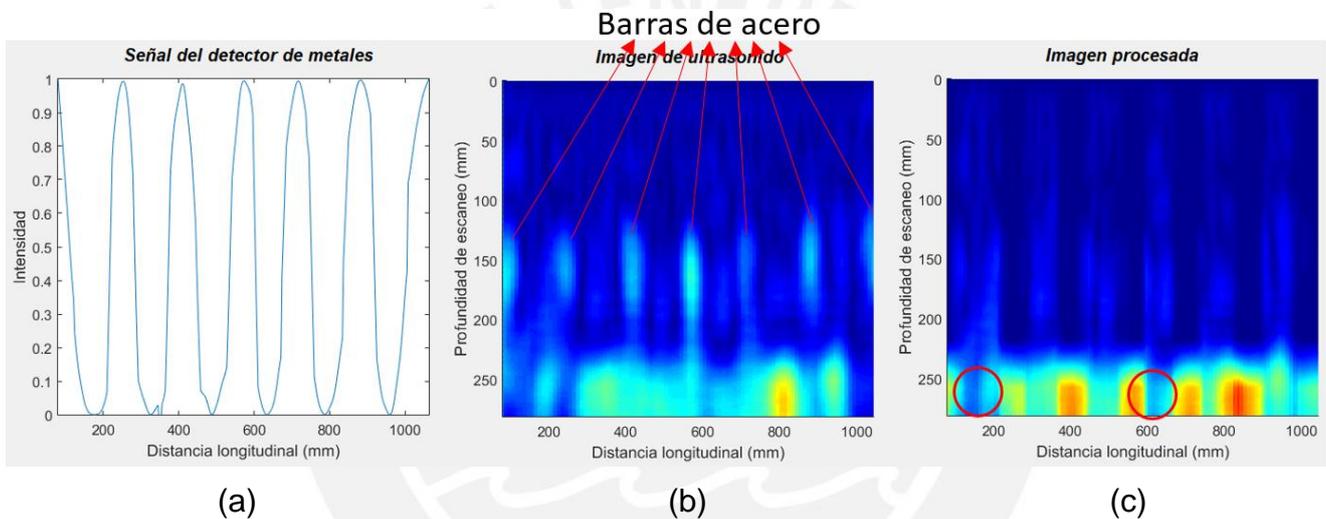


Figura 52: Escaneos del puente

- (a) Señal del detector de metales
- (b) Imagen del pulso eco ultrasónico
- (c) Imagen procesada

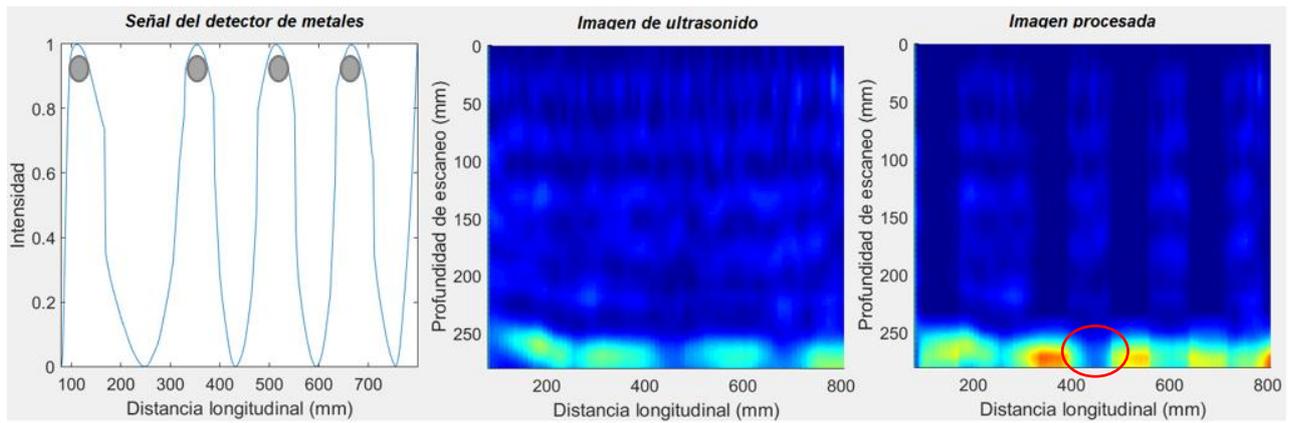
5.5.2. CISTERNA – TACNA

Por otra parte, se realizó el escaneo del muro perimetral de una cisterna en Tacna, en el cual también se quería verificar la existencia de vacíos internos en el elemento de concreto (véase figura 53).



Figura 53: Escaneo de cisterna

En la figura 54 se muestra el escaneo y el procesamiento realizado de una porción del muro perimetral de la cisterna. En la figura 54a se muestra la señal de detector de metales obtenida, en la 54b la imagen de ultrasonido sin procesar, y en la 54c la imagen de ultrasonido procesada. En la figura 54b se aprecia que no se detectaron las barras de acero pero si algunas aberturas en la imagen de ultrasonido. Sin embargo, al procesar la imagen todas las sombras desaparecen a excepción de una (véase figura 54c). Este muro perimetral en realidad tenía una doble malla de acero, por lo que el equipo del detector de metales solo detectó la malla más cercana a la cara de análisis y no la posterior, por lo que es posible que uno de los aceros de la malla profunda es la que deja una abertura en la figura 54c.



(a)

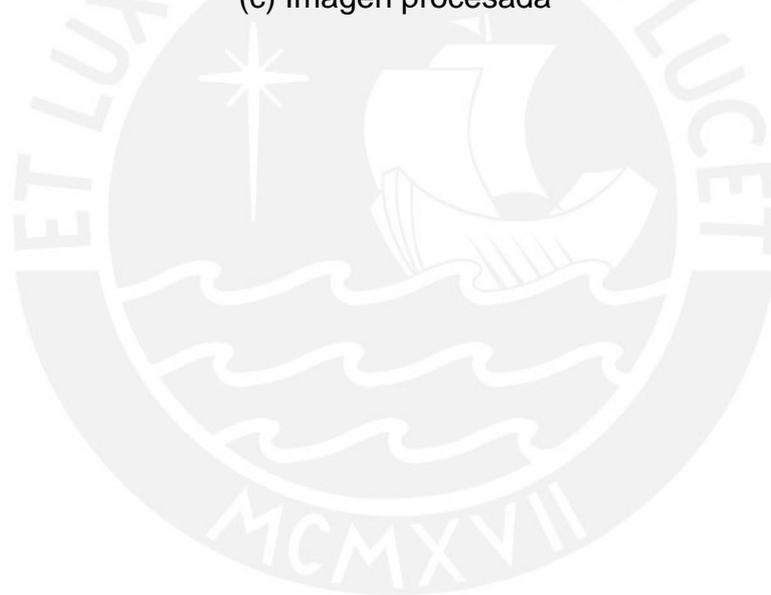
(b)

(c)

Figura 54: Procesamiento de señales – Tacna

a) Señal del detector de metales (b) Imagen del pulso eco ultrasónico

(c) Imagen procesada



CAPÍTULO 6: METODOLOGÍA Y CONCLUSIONES

6.1. METODOLOGÍA

A partir de los resultados obtenidos, se plantea la siguiente metodología para escanear un elemento de concreto armado:

- Se debe marcar la zona que se desee escanear, en una franja de 110 mm de ancho (debido al ancho del equipo) y verificar que la superficie de esta franja sea lo suficientemente plana y libre de tarrajeo. En caso de rugosidades utilizar una piedra pómez u otro material para alisar la superficie de la franja a escanear. También, se debe retirar cualquier objeto de metal de la superficie, como por ejemplo alambres atrapados que fueron utilizados para asegurar el encofrado.
- Con el detector de metales se debe escanear perpendicularmente a la franja, y verificar que no existan barras con la misma dirección de la franja, y si existiese, ubicar otra franja alejada de estas barras. En caso de que se requiera analizar esta franja se debe verificar que el acero sea menor o igual a 3/8" de diámetro para así evitar la probabilidad de que las barras aparezcan en la imagen de ultrasonido. Sin embargo, se recomienda no escanear sobre barras con la misma dirección que la franja analizada.
- Se debe marcar el punto de inicio y el punto final de la franja escaneada. Si se analiza un elemento de borde a borde se tiene que considerar una compensación horizontal de 80 mm inicial y final para el equipo de ultrasonido, y de 40 mm para el detector de metales (Esta compensación puede variar dependiendo a los equipos utilizados).
- Por medio del detector de metales se debe escanear toda la franja para ubicar los aceros transversales a la franja. Tener en cuenta que si existiesen aceros

transversales separados una distancia menor a 50 mm, es posible que estos se solapen entre sí en el escaneo y será casi improbable ubicar vacíos o elementos internos entre estas barras.

- Por medio del equipo pulso eco ultrasónico se debe hallar la velocidad de la onda “S” en el material. Si se conoce el espesor de la franja escaneada, se debe obtener la velocidad por medio del tiempo de llegada de la onda colocando el espesor real del elemento en el equipo; en cambio, si no se conoce el espesor con exactitud se debe estimar la velocidad por medio de los transductores del equipo. Se recomienda obtener por lo menos cinco velocidades y promediarlos para obtener mejores resultados.
- Antes de iniciar el escaneo, se debe verificar que el voltaje y la ganancia sean adecuados para el escaneo con el equipo de ultrasonido. Para ello, se debe ingresar en el equipo la opción “Escaneo B”, iniciar el escaneo, presionar el equipo en el material y verificar la amplitud de la onda. En caso de que la onda tenga una amplitud muy pequeña se debe incrementar primero el voltaje y después la ganancia. Se recomienda que la amplitud esté entre el 50 y 80%, y además calibrar por lo menos en cinco puntos para tener un voltaje y una ganancia adecuada.
- Ahora ya se puede escanear la franja con el equipo pulso eco ultrasónico. Para ello se debe seleccionar inicialmente el espaciamiento entre escaneos parciales. Se recomienda que para franjas cortas el espaciamiento sea de 10 mm y para franjas largas de 20 mm o más. Luego, se debe elegir la opción “Escaneo B” y realizar el escaneo de toda la franja.
- Si se encuentra una mancha dentro del espesor del elemento o una abertura en el borde final en el escaneo, se debe verificar que este no sea producto de

un acero transversal por medio del detector de metales. En el caso que no se detecte como acero, se debe analizar una nueva franja perpendicular a la mancha o abertura, para así asegurar la existencia de vacíos o elementos internos en la zona de controversia.

- Por último se puede filtrar la imagen de ultrasonido con la señal del detector de metales para así visualizar la imagen sin presencia del acero transversal.

6.2. CONCLUSIONES

- Para detectar vacíos en el concreto armado usando un pulso eco ultrasónico, es imprescindible el uso de un equipo de detector de metales, ya que las barras de acero aparecen en los escaneos de ultrasonido.
- En un escaneo en franja con un equipo ultrasonido, dos barras transversales a la dirección del escaneo separadas 50 mm comúnmente aparecen como una única mancha o abertura, por lo que es complicado distinguir si hay un vacío o elemento interno entre estas.
- El acero transversal a la franja escaneada aparece con mayor probabilidad cuando este es de mayor diámetro y disminuye cuando es de menor dimensión. Además, es más probable detectar un acero transversal que se encuentre a una profundidad de 150 mm que aquel que se encuentre a 50 mm. Este efecto se puede dar ya que las ondas necesitan aproximadamente los primeros 50 mm para estabilizarse entre sí, por lo que es complicado detectar vacíos o elementos internos en esta zona.
- Cuando se realizaron escaneos sobre aceros longitudinales (con la misma dirección que la franja escaneada) de diámetros 5/8" y 1/2" distanciados 50 mm, estos se mostraban en gran magnitud en las imágenes de ultrasonido, por lo que es muy complicado distinguir si existe algún otro material en estas

zonas. Sin embargo, en el caso de escanear sobre aceros longitudinales de 3/8" de diámetro separados 50 mm o 100 mm, las barras de acero no aparecen en las imágenes, por lo que existe la posibilidad de ubicar vacíos u objetos dentro de la franja analizada, pero no es recomendable.

- En escaneos sobre aceros longitudinales de diámetros 5/8" y 1/2" que estén distanciados 100 mm, la probabilidad de que estos aparezcan como manchas es menor que a los que estaban distanciados 50 mm. No obstante, aún existe la probabilidad de confundir estos aceros con otros elementos si no se tiene la certeza que son barras de acero.
- El equipo es eficiente para detectar esferas de 50 mm con una probabilidad de 81.25% en concreto reforzado cuando se analicen franjas con aceros en la misma dirección del escaneo, distanciados mayor o igual que 150 mm, o con aceros transversales distanciados mayor o igual a 100 mm. Esta confiabilidad es muy cercana al valor 82.35% obtenida en una investigación pasada al ubicar esferas de poliestireno expandido de 50 mm de diámetro (Lipa et al. 2015).
- Con relación al código, este programa es útil para borrar de la imagen de ultrasonido el efecto del acero transversal a la dirección del escaneo, y así ver únicamente en un escaneo la presencia de vacíos o elementos internos. Este programa ha sido desarrollado sólo con fines de visualización, ya que la matriz de cada imagen ha perdido su naturaleza inicial. Tomar en cuenta que el programa puede no ser completamente eficaz si es que la calidad de la señal e imagen obtenida ha sido deficiente.

6.3. PROYECCIONES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Con el fin de optimizar esta metodología, se espera que en un futuro se realicen investigaciones que complementen o ayuden a perfeccionar la precisión y la confiabilidad de los resultados obtenidos. De este modo, estos métodos NDT reducirán la cantidad de ensayos destructivos que se necesiten en una estructura, y también, disminuirán costos y daños en el concreto. Por ello se proponen las siguientes líneas de investigación con un equipo pulso eco ultrasónico:

- Evaluación de elementos de concreto armado con diferente relación agua cemento.
- Evaluación de elementos de concreto armado con diferentes espesores de tarrajeo o solaqueo.
- Estimación del espesor del concreto dañado por incendios o debido a altas temperaturas.
- Ensayos en concretos porosos o de baja densidad.
- Detección de vacíos y medición de espesores en asfalto.

REFERENCIAS

ACI 214R. Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete. American Concrete Institute Report ACI, Farmington Hills, 16 pages, 2011.

ACI 228.2R. Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. American Concrete Institute Report ACI, Farmington Hills, Michigan, 82 pages, 2013.

ASTM C39. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2017.

ASTM C138. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield and Air Content (Gravimetric) of concrete, 2014.

ASTM C143. Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete, 2015.

ASTM C150/C150M-e1 Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, 2016.

ASTM C192. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, 2014.

ASTM C597. Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, 2009.

ASTM E1901, Standard Guide for Detection and Evaluation of Discontinuities by Contact Pulse-Echo Straight-Beam Ultrasonic Methods, ASTM International, West Conshohocken, 2013.

Ajwad, A., Ilyas, U., Rashid, M. U., & Shafiq, M. I. Assessing Strengthening Techniques of Bonding overlay Concrete to Existing Concrete Elements. NFC IEFER Journal of Engineering and Scientific Research, vol. 5, 2018.

BS 1881 part 204. Testing concrete. Recommendations on the use of electromagnetic covermeters, 1988.

Carino N. J. Laboratory Study of Flaw Detection in Concrete by the Pulse-Echo Method. *ACI Special Publication*, vol. 82, pp. 557–580, 1984.

Carino, N. J. Stress Wave Propagation Methods. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, second edition, V. M. Malhotra and N. J. Carino, eds., CRC Press, Boca Raton, FL, and ASTM International, West, Conshohocken, 2004.

Carino N. J. Stress-Wave Methods for Concrete Structures. NDT of concrete structures, IMCYC, 2014.

Cassidy N. J., Eddies R., Dods S. Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground-penetrating radar and ultrasonic techniques. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 74, no. 4, pp. 263-276, 2011.

De La Haza A. O., Samokrutov A. A., Samokrutov P. A. Assessment of concrete structures using the Mira and Eyecon ultrasonic shear wave devices and the SAFT-C image reconstruction technique. *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 1276–1291, 2013.

Doctor S. R., Hall T. E., Reid L. D. SAFT - the evolution of a signal processing technology for ultrasonic testing. *NDT Int.*, vol. 19, no. 3, pp. 163–167, 1986.

Fernández A. Ensayos no destructivos por ultrasonidos. Centro para la calidad en Asturias, Oviedo, 1994.

Fuller W. B., Thompson S. E. The laws of proportioning concrete. *Transactions, ASCE*, vol. 59, 1907.

Haach V. G. y Ramirez F. C. Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography. *Constr. Build. Mater.*, vol. 119, pp. 61–70, 2016.

Hosseini Z., Momayez M., Hassani F., Lévesque D. Detection of inclined cracks inside concrete structures by ultrasonic saft. *AIP Conference Proceedings*, vol. 975, pp. 1298–1304, 2008.

Krautkrämer, J., and Krautkrämer, H. *Ultrasonic Testing of Materials*, 4th Edition, Springer-Verlag, New York, 1990.

Lide, D. R. *CRC handbook of chemistry and physics*, pp. 14.41 y 15.29, 2012.

Lipa L., Álamo J. D, Navarro L. M., Pasquel E. N. Metodología para la detección de vacíos y medición de espesores en el concreto, por medio del pulso ultrasónico. Pontificia Universidad Católica del Perú, 2015.

Malhotra V. M., Carino N. J. *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. Second ed., CRC Press, Boca Raton, 2004.

Manual proceq pundit PL200PE. Manual de operación, 2017.

Manual proceq profometer 630 AI. Manual de operación, 2017.

Martin, T. "Ultrasonic testing on EUROFER welded joints for determination of the minimum detectable flaw size". KIT Scientific Publishing, V. 7543, pp 1-2, 2010.

Pasquel E. N. Diagnóstico y solución de problemas en concreto endurecido. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Diapositivas periodo 2010–1, pp. 7.

Shandiz H. T. Gaydecki P. A. An enhanced, high-speed ultrasonic SAFT system for imaging of defects within concrete structures. D. O. Thompson, D. E. Chimenti, & L. Poore (Eds.), AIP Conference Proceedings, vol. 557, no. 1, pp. 703-709, AIP, 2001.

Tong J. H., Chiu C. L., Wang C. Y. Improved synthetic aperture focusing technique by Hilbert-Huang transform for imaging defects inside a concrete structure. IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol. 57, no. 11, 2010.

