

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN DE VACÍOS Y
MEDICIÓN DE ESPESORES EN EL CONCRETO, POR MEDIO
DEL PULSO ULTRASÓNICO**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presentan los bachilleres:

Leonel Lipa Cusi

José Del Alamo Carazas

ASESORES: Enrique Pasquel Carbajal

Laura Navarro Alvarado

Lima, noviembre de 2015

RESUMEN

Las construcciones han aumentado significativamente en el país, y de este modo, también los ensayos relacionados con los materiales usados para este fin. Los ensayos no destructivos buscan disminuir los ensayos destructivos en el concreto, ya que estos pueden analizar directamente la estructura sin alterarla.

En el caso de una construcción, no se aprecia a simple vista si el concreto endurecido posee internamente vacíos o cangrejas, por lo que para tener seguridad, se extraen núcleos de concreto de las zonas en controversia para así asegurar la uniformidad del concreto vaciado. El motivo de esta tesis es realizar una metodología para localizar vacíos dentro del concreto por medio de equipos de ultrasonido. Estos vacíos serán simulados por medio de esferas de poliestireno expandido y envases huecos de plástico o cartón. Los especímenes de concreto fabricados son: vigas de 15 x 15 x 52 cm con esferas de poliestireno expandido, y muros de 25 x 25 x 50 cm con poliestireno expandido y/o envases huecos en su interior. Para este fin, se utilizará un equipo ultrasónico de ondas P y un equipo pulso eco de ondas S. En el caso del ultrasonido de ondas P, se localizarán los materiales introducidos por medio de la variación de la velocidad de ultrasonido, sin embargo, con el equipo de pulso eco se utilizará la variación en el tiempo de viaje de las ondas del emisor al receptor.

También, con el equipo pulso eco se medirá la profundidad perturbada por efecto de las ondas producidas, el sesgo en ubicación y profundidad de los materiales introducidos y el error en porcentaje al analizar espesores de los elementos de concreto fabricados.

DEDICATORIA

A mis padres, Leonidas y Norma, que siempre han estado ahí para ayudarme a culminar esta gran meta. A mis hermanos, que sé que realizarán grandiosas investigaciones como esta tesis. A la Ing. Laura Navarro, por todo el gran apoyo brindado a cada momento, desde el inicio, hasta culminar la investigación. A mis compañeros del Laboratorio de Estructuras y a mis amigos, ya que sin ellos, este logro jamás hubiera sido completado.

Leonel Lipa Cusi

A Dios Todopoderoso, fuente de toda sabiduría y de quien todo depende. A la Santísima Virgen, siempre presente en mi vida.

A mis padres, Julio e Irma, que con su amor, esfuerzo, sacrificio y constante apoyo fueron el soporte en toda mi vida de estudiante y me impulsaron a alcanzar mis ideales.

A mis tíos Dunia, Fabio y demás familiares que siempre me demostraron su apoyo, preocupación y aprecio.

Jose Del Álamo Carazas

NUESTRO AGRADECIMIENTO:

A nuestros asesores, Ing. Enrique Pasquel e Ing. Laura Navarro, que con paciencia y alto profesionalismo supieron conducir la elaboración del presente trabajo de tesis.

A las empresas: Unión de Concreteras (UNICON), Unión Andina de Cementos (UNACEM) y Química Suiza por su aporte con los materiales para esta investigación.

Al grupo de ingenieros y personal del Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la PUCP, por su valioso apoyo en los ensayos realizados.

INDICE

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1. OBJETIVO ESPECÍFICO	2
1.2.2. OBJETIVOS GENERALES	2
1.3. HIPÓTESIS	2
1.4. ALCANCES	3
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	3
2.1 ENSAYOS EN EL CONCRETO	3
2.1.1 ENSAYOS EN EL CONCRETO EN ESTADO FRESCO	4
2.1.2 ENSAYOS EN EL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO	5
A) ENSAYOS DESTRUCTIVOS EN EL CONCRETO	6
B) ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EL CONCRETO	7
B.1) TIPOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	7
CAPITULO 3: EL PULSO ULTRASÓNICO Y EL PULSO ECO ULTRASÓNICO	9
3.1. EL SONIDO	9
3.1.1. DEFINICIÓN	9
3.1.2. INTENSIDAD DE ONDA	10
3.1.3. IMPEDANCIA ACÚSTICA (Z)	11
3.1.4. TIPOS DE ONDA	12
a. ONDAS “P”	13
b. ONDAS “S”	13
c. ONDAS SUPERFICIALES	13
3.2. ESTADO DEL ARTE	13
3.2.1. EL ULTRASONIDO EN EL CONCRETO	14
3.3. PULSO ULTRASÓNICO	15
3.3.1. DEFINICIÓN Y CÓMO SE PRODUCE	15
3.3.2. ACOPLAMIENTO DE LOS TRANSDUCTORES	18
3.3.3. DISPOSICIÓN DE LOS TRANSDUCTORES	18
a. TRANSMISIÓN DIRECTA	18
b. TRANSMISIÓN SEMIDIRECTA	18
c. TRANSMISIÓN INDIRECTA O DE SUPERFICIE	19
3.3.4. APLICACIONES	19
3.3.5. EQUIPO	20

3.4. EL PULSO ECO	22
3.4.1. FUNCIONAMIENTO DEL PULSO ECO	22
3.4.2. APLICACIONES	30
3.4.3. EQUIPO	30
a. LONGITUD DE ONDA	31
b. SEPARACIÓN ENTRE TOMA DE DATOS – SCAN B	32
c. ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ONDA S	32
d. MODOS DE OBTENCIÓN DE DISCONTINUIDADES	32
e. COMPENSACIÓN HORIZONTAL.....	33
f. ZONA MUERTA Y CAMPO CERCANO	34
g. ESCANEO DEL ESPESOR	35
h. ESCANEO DEL RECUBRIMIENTO Y DISTANCIA HORIZONTAL DEL VACÍO	36
i. ANCHO DEL VACÍO APROXIMADO	37
 CAPÍTULO 4: RECURSOS NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE LOS ENSAYOS	 38
4.1. INSUMOS PARA MEZCLA DEL CONCRETO	38
4.2. EQUIPO DE ULTRASONIDO.....	39
4.3. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS COMPLEMENTARIOS	40
 CAPÍTULO 5: DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN.....	 41
5.1. ETAPA 1: ENSAYOS PRELIMINARES	41
5.1.1. PLANIFICACIÓN.....	41
5.1.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTROL	41
5.2. ETAPA 2: FABRICACIÓN DE VIGAS DE CONCRETO	43
5.2.1. DISTRIBUCIÓN DE LOS VACÍOS	43
5.2.2. ENCOFRADO Y VACIADO DE LAS VIGAS	46
5.2.3. PROCEDIMIENTO PARA EL ESCANEO	49
5.3. ETAPA 3: FABRICACIÓN DE MUROS DE CONCRETO	52
5.3.1. DISTRIBUCIÓN DE LOS VACÍOS	52
5.3.2. ENCOFRADO Y VACIADO DE LOS MUROS	53
5.3.3. PROCEDIMIENTO PARA EL ESCANEO	56
 CAPÍTULO 6: RESULTADOS OBTENIDOS.....	 58
6.1. VIGAS DE CONCRETO.....	58
6.1.1. ENSAYOS EN CONCRETO FRESCO Y ENDURECIDO	58
6.1.2. ESCANEO CON ULTRASONIDO (ONDAS P)	58

6.1.3.	ESCANEEO CON PULSO ECO (ONDAS S)	60
a.	PROFUNDIDAD DE LA ZONA MUERTA Y CAMPO CERCANO	62
b.	VELOCIDAD DE ONDA	63
c.	DETERMINACIÓN DEL ESPESOR	65
d.	UBICACIÓN DE VACÍOS	66
6.2.	MUROS DE CONCRETO	69
6.2.1.	ENSAYOS EN CONCRETO FRESCO Y ENDURECIDO	69
6.2.2.	ESCANEEO CON ULTRASONIDO (ONDAS P)	70
6.2.3.	ESCANEEO CON PULSO ECO (ONDA S)	72
a.	PROFUNDIDAD DE LA ZONA MUERTA Y CAMPO CERCANO	74
b.	VELOCIDAD DE ONDA	75
c.	DETERMINACIÓN DEL ESPESOR	75
d.	UBICACIÓN DE VACÍOS	77
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		87
7.1.	CONCLUSIONES	87
7.1.1.	ONDAS LONGITUDINALES (ONDAS P)	87
7.1.2.	ONDAS TRANSVERSALES (ONDAS S)	88
a.	ZONA MUERTA Y CAMPO CERCANO	88
b.	ESFERAS ENCONTRADAS EN LAS VIGAS	89
c.	ESCANEEO DEL ESPESOR	90
d.	UBICACIÓN DE VACÍOS	90
7.1.3.	CORRELACIÓN ENTRE ONDA P Y S	92
7.1.4.	FUENTES DE ERROR	94
7.2.	RECOMENDACIONES	95
7.3.	PROYECCIONES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	96
BIBLIOGRAFÍA		97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1,2,3: Cono de Abrams / Olla de presión / Termómetro.....	5
Figura 4: Onda Sonora.....	10
Figura 5: ondas “P”.....	13
Figura 6: Ondas “S”.....	13
Figura 7: Diagrama del ultrasonido.....	16
Figura 8: Esquema del transductor.....	17
Figura 9:a)Transmisión directa b)Transmisión semidirecta c)Transmisión Indirecta	19
Figura 10: Curva de señal onda “P”	21
Figura 11: Pulso ECO PROCEQ.	22
Figura 12: Eco de onda “S”.....	23
Figura 13: Diagrama del haz ultrasónico.	24
Figura 14: Vibración y generación de ondas individuales.	25
Figura 15 y 16: Funcionamiento del pulso eco (parte 1)	26
Figura 17 y 18: Funcionamiento del pulso eco (parte 2).	26
Figura 19: Funcionamiento del pulso eco (parte 3).	27
Figura 20: Funcionamiento del pulso eco (parte 4)	27
Figura 21: Scan-B.	28
Figura 22: Ejemplo de la señal original y la señal con envoltura.....	28
Figura 23 y 24: Función Envelope – pulso eco PROCEQ.....	29
Figura 25: Ganancia de color – pulso eco PROCEQ.	29
Figura 26 y 27: Vista frontal y posterior del equipo pulso eco.	31
Figura 28: Manipulación del equipo pulso eco.....	31
Figura 29: Modos de obtención de discontinuidades – pulso eco.....	33
Figura 30: Compensación horizontal.	34
Figura 31: Zona muerta y campo cercano.	35
Figura 32: Escaneo del espesor del espécimen	36
Figura 33: Ubicación de discontinuidades	36
Figura 34: Ancho de vacíos (aproximado).....	37
Figura 35: Equipo de ultrasonido (Ondas P).....	40
Figura 36: Equipo de pulso eco (Ondas S).....	40
Figura 37: Viga de 15x15.5x55 cm.	45
Figura 38 y 39: Fabricación de encofrado de 15 x 15 cm.....	46
Figura 40: Vista superior del diseño de la viga.	46
Figura 41: Prensas para tensar el nylon.	47
Figura 42: Detalle de la compactación (vista superior de la viga).	48
Figura 43 y 44: Encofrado y desencofrado de vigas.	48
Figura 45: Procedimiento en la medición con ondas P de las vigas.	49
Figura 46: Zonas no registradas por el equipo de ultrasonido.	50
Figura 47: Escaneo de una viga con el pulso eco.	50

FIGURA 48: Dirección de escaneo en cada cara de viga.	51
Figura 49: Corte de vigas de concreto.	51
Figura 50: Materiales utilizados como vacíos dentro de los muros.	52
Figura 51: Encofrado del muro tipo 1.	54
Figura 52 y 53: Encofrado del muro tipo 2 y 3.	54
Figura 54: Detalle de la compactación (vista superior del muro).	55
Figura 55: Compactación muro tipo 1.	55
Figura 56 y 57: Desencofrado de los muros.	55
Figura 58: Zonas analizadas con el equipo de ultrasonido.	56
Figura 59: Zonas no escaneadas por el equipo de ultrasonido.	56
Figura 60: Franjas escaneadas - Cara "A" y "B".	57
Figura 61: Franjas escaneadas - Cara "C" y "D" (muro rotado 90 grados).	57
Figura 62: Resumen de vigas.	61
Figura 63: Detalle de los escaneos con pulso eco (anexo digital 1).	67
Figura 64: SCAN B - esferas de 2.5cm: V7-2L(2)-1 (Cara superior).	68
Figura 65: SCAN B – esferas de 5cm: V12-3Bo-3 (Cara inferior).	68
Figura 66: Resumen de muros.	73
Figura 67: Detalle de los escaneos con pulso eco (anexo digital 2).	78
Figura 68: Scan B – Cubos de poliestireno expandido: M2-A-DERECHA2.	78
Figura 69: Scan B – Tuberías de PVC y acero: M6-B-ABAJO2.	79
Figura 70: Escaneo longitudinal del tubo de PVC de 2".	85
Figura 71: Escaneo longitudinal del tubo de PVC de 3".	86
Figura 72: Escaneo longitudinal del acero de 1".	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: ensayos no destructivos en el concreto (parte 1).....	8
Tabla 2: ensayos no destructivos en el concreto (parte 2).....	8
Tabla 3: Rango de frecuencias.....	9
Tabla 4: Velocidad del sonido según el medio de propagación.....	10
Tabla 5: niveles de intensidad del sonido.....	11
Tabla 6: Impedancia acústica según el tipo de material.....	12
Tabla 7: Clasificación de la calidad del concreto según Leslie y Cheesman.....	15
Tabla 8: Clasificación de la calidad del concreto según Agraval.....	15
Tabla 9: Relaciones relativas de velocidades de onda ($v=0.2$).....	15
Tabla 10: Características del equipo de ultrasonido PL-200.....	39
Tabla 11: Características del equipo pulso eco PL-200PE.....	40
Tabla 12: Parámetros de control.....	41
Tabla 13: Secuencia de mezclado.....	42
Tabla 14: Ensayos de control preliminares en concreto.....	42
Tabla 15: Vigas con esferas de 1.4cm.....	44
Tabla 16: Vigas con esferas de 2.5cm.....	44
Tabla 17: Vigas con esferas de 5cm.....	45
Tabla 18: Vigas con cubos de 5,7 o 10cm.....	45
Tabla 19: Procedimiento en la fabricación de vigas.....	47
Tabla 20: Tipos de muros.....	53
Tabla 21: Procedimiento en la fabricación de muros.....	54
Tabla 22: Ensayos de control en vigas de concreto.....	58
Tabla 23: Resultados de la velocidad onda P en vigas.....	59
Tabla 24: Resultados de la velocidad onda P en vigas (resumen).....	60
Tabla 25: Zona muerta y campo cercano - vigas.....	62
Tabla 26 : Velocidad de la onda S en las vigas.....	64
Tabla 27: Error del equipo al escanear espesores en vigas de 15cm.....	66
Tabla 28 y 29: Error máximo escaneado: ubicación horizontal de las esferas / profundidad del vacío.....	69
Tabla 30: Error máximo escaneado: diámetro de esferas.....	69
Tabla 31: Ensayos de control en muros de concreto.....	70
Tabla 32: Resultados de la velocidad onda P en muros tipo 1.....	70
Tabla 33: Resultados de la velocidad onda P en muros tipo 2.....	71
Tabla 34: Resultados de la velocidad onda P en muros tipo 3.....	72
Tabla 35: Zona muerta y campo cercano muros ($w/c=0.7$).....	74
Tabla 36: Zona muerta y campo cercano muros ($w/c=0.6$).....	74
Tablas 37 y 38: Velocidad de la onda S en los muros con $w/c=0.7$ / $w/c=0.6$	75
Tabla 39: Error del equipo al escanear espesores de 25 cm ($w/c=0.7$).....	76
Tabla 40: Error del equipo al escanear espesores de 25 cm ($w/c=0.6$).....	76

Tabla 41: Error del equipo al escanear espesores de 50 cm.	77
Tabla 42: Resultados del poliestireno expandido de 30x5x5cm.....	80
Tabla 43: Resultados de las esferas de plástico de 7 cm.	81
Tabla 44: Resultados de la botella de plástico.	81
Tabla 45: Resultados del envase de cartón.	82
Tabla 46: Resultados de los cubos de poliestireno expandido.....	82
Tabla 47: Resultados del poliestireno expandido de 15x5x5cm.....	83
Tabla 48: Resultados del tubo de PVC de 2”.....	83
Tabla 49: Resultados del tubo de PVC de 3”.....	84
Tabla 50: Resultados del acero de 1”.....	85
Tabla 51: Grado de confiabilidad al ubicar esferas de poliestireno expandido.	87
Tabla 52: Grado de confiabilidad al ubicar los materiales de los muros.	88
Tabla 53: Resumen de resultados de la zona muerta.	88
Tabla 54: Resumen de resultados de la zona muerta más el campo cercano.....	89
Tabla 55: Resumen de presencia de zona muerta y campo cercano.	89
Tabla 56: Grado de confiabilidad al ubicar las esferas – onda S.	90
Tabla 57: Resumen del error máximo al escanear espesores.	90
Tabla 58: Resumen de velocidades promedio (ondas S).....	92
Tabla 59: Correlación entre onda S y onda P – vigas.	93
Tabla 60: Correlación entre onda S y onda P – muros w/c=0.7.	93
Tabla 61: Correlación entre onda S y onda P – muros w/c=0.6.	93

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La construcción es una de las principales actividades económicas del Perú en los últimos años, a su vez, es una de las de mayor crecimiento debido a las inversiones públicas y privadas realizadas en el País. Este crecimiento también involucra al incremento del consumo de concreto, el cual es uno de los materiales más utilizados en esta industria. El concreto ha llegado a ser el material por excelencia en la construcción debido a sus cualidades de resistencia, durabilidad y versatilidad.

Sin embargo, existen prácticas arraigadas y/o procesos constructivos deficientes en las que se producen problemas en la calidad del concreto que afectan la capacidad estructural, lo cual fuerza muchas veces a realizar ensayos en el concreto ya endurecido. Por ello en estos últimos años, una dificultad no es la elaboración del concreto, sino el de evitar fisuras, vacíos y defectos en los elementos fabricados, los cuales pueden poner en riesgo la estructura completa.

La falta de experiencia en técnicas de vaciado y ética en el personal, como sucede en obras informales, hace que el concreto sea pobre, de baja resistencia y de mayor costo. Casos comunes en obra son: la mala dosificación de la mezcla, el sobre-vibrado, la mala distribución de capas de vaciado, segregación, curado pobre, entre otros. Ante esta situación, es deseable realizar ensayos para verificar la calidad del concreto, los cuales sean lo menos destructivos posibles, así como también lo más económicos y precisos.

Como un caso, para determinar la resistencia del concreto se elaboran probetas cilíndricas de concreto por cada mezcla utilizada en obra. Se asume que estas probetas son una representación del concreto que fue vaciado sometiendo a compresión dichas probetas a los 28 días de curado; sin embargo, las resistencias de las probetas no son idénticas a la resistencia de los elementos a las que representan debido a los diferentes métodos en el que fueron vaciados y curados. Por ejemplo según el ACI 318, el promedio de tres núcleos de concreto extraídos de un mismo elemento, pueden tener hasta un 15% menos de la resistencia de las probetas con las cuales son representadas. Estas probetas y núcleos son destruidas al ser ensayadas y no son reutilizables, es decir, hay intervenciones destructivas.

Los ensayos no destructivos tratan de disminuir estas intervenciones y actuar directamente en la estructura, buscando hallar la resistencia real, durabilidad y/o condición del concreto in situ (como daños por efecto de incendios, condiciones hielo y deshielo, y sales perjudiciales). También, algunos de estos ensayos permiten registrar vacíos, fisuras y otras anomalías en el interior del concreto. Una de estas alternativas es el ensayo por medio de un equipo de ultrasonido, el cual permite determinar algunas propiedades y condiciones del concreto sin deteriorarlo ni destruirlo. Por ende, se pueden realizar infinitos ensayos en los elementos analizados.

En esta tesis se elaborará una metodología para encontrar vacíos dentro del concreto, y medir espesores de elementos de concreto por medio de ondas ultrasónicas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO ESPECÍFICO

- a. Establecer una metodología con el uso de pulsos ultrasónicos para localizar vacíos dentro del concreto, los cuales son representados por poliestireno expandido o envases huecos; y para medir espesores de elementos de concreto.

1.2.2. OBJETIVOS GENERALES

- a. Analizar la perturbación que sufre la velocidad de ultrasonido al encontrarse con un elemento hueco o de poliestireno expandido.
- b. Medir la zona desde donde es posible detectar concavidades, ya que las ondas sufren una perturbación de entrada al ser emitidas en un material.

1.3. HIPÓTESIS

- a. La velocidad de onda del pulso ultrasónico disminuye al encontrarse un material diferente en el recorrido de la onda.
- b. El error máximo del pulso ultrasónico al analizar el espesor de un concreto es de 10%.
- c. Se detecta vacíos en el concreto desde los 2 cm de profundidad.
- d. En un elemento de concreto simple, se detectan vacíos mayores o iguales a 1.4 cm de diámetro.

1.4. ALCANCES

Los alcances son los siguientes:

- El concreto estudiado tiene una relación agua cemento de 0.7 para el caso de las vigas y los muros a construir. Como un adicional se realizaron muros con relación agua cemento 0.6.
- Se utilizaron los moldes estándar de vigas de 15x15x52cm como encofrado para las vigas, por otro lado, se construyeron encofrados de madera para los muros de 25x50x50cm.
- Para simular los vacíos en las vigas, se utilizaron esferas de poliestireno expandido de 1.4, 2.5 y 5cm de diámetro.
- En los muros se insertaron prismas de 5x5x25cm, 5x5x30cm y cubos de 5cm de poliestireno expandido. Además se utilizaron envases huecos de cartón (7cm de diámetro y 23cm de longitud), esferas de plástico (7cm de diámetro), botellas de plástico (5cm de diámetro) y tubos de PVC (2 y 3 pulgadas de diámetro). Como un adicional, se introdujeron barras de acero corrugado de 1 pulgada de diámetro.
- Se utilizaron transductores de onda longitudinal de 54 Khz y un equipo de pulso eco con transductores de ondas de corte de 50 Khz.
- El espaciamiento entre la toma de datos del escaneado con el pulso eco será de 0.5 cm.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 ENSAYOS EN CONCRETO

El concreto es un material que presenta dos estados físicos distintos: el concreto fresco, un semilíquido más o menos viscoso, el cual se obtiene inmediatamente después del mezclado y por un breve período; y el concreto endurecido, el cual se da después de fraguar el concreto fresco en un estado sólido, por el resto de su vida útil. Debido al cumplimiento de los requerimientos de diseño y los requisitos de colocación, es necesario realizar ensayos en este material en sus dos estados físicos.

En esta investigación, se establecieron parámetros de control en ambos estados, con el fin de tener menos variables en el transcurso del proyecto.

2.1.1 ENSAYOS EN EL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

Estos ensayos se realizan para verificar las características de colocación, transporte y acabado del concreto, y el efecto de los componentes en la mezcla final. Estos ensayos también se usan para la verificación de los parámetros asumidos en el diseño de mezcla. El tiempo para realizar estos ensayos no debe exceder de 15 minutos desde la toma de la muestra representativa (NTP 339.036: Toma de muestras del concreto fresco, ASTM C172: Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete).

Medición del asentamiento por medio del cono de Abrams (NTP 339.035, ASTM C143):

La trabajabilidad se mide indirectamente a través del asentamiento o slump del concreto. Este se mide de manera visual, ya que no se puede medir directamente.

Este ensayo permite medir la consistencia del concreto que se refiere al grado de fluidez de la mezcla e indica qué tan rígido está el concreto.

Para esto, se debe llenar con concreto un molde metálico troncocónico de dimensiones normalizadas (cono de Abrams). El llenado se realiza en tres capas, de igual volumen, apisonadas 25 veces con una varilla de 5/8". No olvidar que estos pisones deben ser distribuidos uniformemente. Luego de enrasar la superficie de la última capa, se retira el molde verticalmente, para luego medir el asentamiento de la masa de concreto colocada en su interior. El slump es la diferencia entre la altura del molde troncocónico invertido, y la altura del cono de mezcla de concreto asentado. La medida se registra en la zona central del cono de concreto fresco.

Peso unitario del concreto (NTP 339.046, ASTM C138):

Este ensayo se utiliza para determinar el peso unitario de una mezcla. Para ello, se utiliza un molde rígido, el cual es llenado en tres capas de igual volumen. Cada capa es apisonada 25 veces con una varilla de 5/8" y además, se golpea lateralmente el exterior del recipiente entre 10 a 15 veces con un martillo de goma, con el fin de retirar las burbujas de aire del concreto fresco. Para obtener la densidad se divide la masa del concreto entre el volumen del recipiente.

Contenido de aire (NTP 339.083, ASTM C138):

Con este ensayo, se determina el contenido de aire que contiene el concreto recién mezclado. Este control es muy importante, ya que un incremento relevante del

mismo se traduce en una disminución de la resistencia por la presencia de vacíos en la mezcla.

Este método se basa en medir el cambio de volumen del concreto sometido a un cambio de presión usando un recipiente medidor de aire.

Temperatura del concreto fresco (NTP 339.184, ASTM C1064):

La temperatura también es un factor importante que influye en el tiempo de fraguado y ganancia temprana de la resistencia del concreto.

La temperatura acelera los procesos de hidratación, por lo que un concreto con temperatura inicial alta, tendrá una resistencia superior a lo normal a edades tempranas, como también una resistencia más baja a edades posteriores, en otras palabras, la calidad final del concreto disminuirá. El concreto curado a temperaturas bajas desarrollará su resistencia a una tasa más lenta, pero finalmente tendrá una resistencia más alta y será de mayor calidad. La temperatura del concreto también afecta el comportamiento de los aditivos en la mezcla.

El ensayo se realiza colocando un termómetro en la muestra de concreto fresco (al menos 3" lejos del borde del recipiente que lo contiene). El dispositivo medidor debe estar por lo menos 2 minutos o hasta que la lectura se estabilice. El ensayo se debe realizar dentro de los 5 minutos después de tomada la mezcla de concreto fresco.



Figura 1,2,3: Cono de Abrams / Olla de presión / Termómetro.

2.1.2 ENSAYOS EN EL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Se efectúan para determinar las propiedades del concreto endurecido como es la resistencia en probetas estándar de concreto ya fraguadas, o en especímenes extraídos de un elemento de concreto endurecido, los cuales pueden ser obtenidos en obra o en laboratorio.

A) ENSAYOS DESTRUCTIVOS EN EL CONCRETO

Se realizan sobre testigos de concreto para determinar, de forma directa, algunas propiedades del concreto, alterando sus dimensiones, composición química, forma, entre otros; por lo que generalmente se efectúan una sola vez por muestra. Algunos de estos ensayos son:

- Resistencia a compresión, resistencia a flexo-tracción, ensayo petrográfico (análisis de las condiciones del concreto por medio de soluciones químicas), contenido de cloruros (si se analiza una sección de concreto), permeabilidad, humedad, tracción indirecta, entre otros.

A.1) Resistencia a compresión de muestras cilíndrica de concreto (NTP 339.034 - ASTM C39):

La resistencia a compresión del concreto es la propiedad de resistencia más controlada para medir el desempeño del material empleado en el diseño de estructuras.

Para ello, se aplica una carga de compresión axial en probetas cilíndricas de concreto por medio de una máquina de compresión. La resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección transversal de la probeta. El esfuerzo de rotura se reporta en megapascales (MPa) y/o en kg/cm^2 .

Estas probetas deben ser elaboradas de la mezcla de concreto que se quiere evaluar. Generalmente se realizan ensayos en compresión a la edad de 3, 7, 14 y 28 días, siendo ésta última la edad de control de la resistencia del concreto.

Las mezclas de concreto se diseñan con el fin de producir una resistencia promedio superior a la especificada. De este modo, se minimiza el riesgo de tener resultados menores a lo especificado.

Procedimiento

Los cilindros deben de tener un tamaño de 6" de diámetro y 12" de altura, o 4" de diámetro y 8" de altura. Para probetas de 6", la norma indica ensayar como mínimo dos probetas por cada mezcla; y para las de 4" se debe ensayar tres probetas como mínimo. El diámetro del cilindro debe ser como mínimo tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso.

Se debe medir dos diámetros perpendiculares entre sí, a media altura de la probeta promediándose para calcular el área de la sección. Si los dos diámetros medidos difieren en más de 2%, la probeta es descartada para este ensayo.

Los extremos de las probetas no deben presentar desviación con respecto a la perpendicularidad del eje del cilindro en más del 0.5%; y además, deben estar planos dentro de un margen de 0.002 pulgadas (0.05 mm).

Luego de cumplir estos requerimientos, cada probeta se debe centrar en el bloque base de la máquina de ensayos y debe ser cargados hasta la rotura.

Se debe aplicar la carga para un incremento de esfuerzo de 0.25 +/- 0.05 MPa. Este incremento debe darse por lo menos en la mitad final para concluir el ensayo.

La resistencia del concreto se calcula dividiendo la máxima carga soportada por la probeta para producir la fractura entre el área promedio de la sección.

Por último, el informe debe reportar: la identificación de la probeta, fecha del ensayo, edad de las probetas, el diámetro de la probeta, máxima carga aplicada, esfuerzo de rotura, tipo de falla y cualquier defecto que presentaron los cilindros.

B) ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EL CONCRETO

Se llaman así debido a que los primeros ensayos no destructivos no dañaban en absoluto el concreto; sin embargo, algunos métodos nuevos producen un daño local superficial.

B.1) TIPOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Desde siempre ha sido difícil evaluar la resistencia del concreto en su estado endurecido sin tener que intervenir directamente en la zona en análisis. La extracción de núcleos de concreto sólo permitía dar información acerca de la zona intervenida, y las zonas dañadas por la extracción tenían que ser rellenadas. Sin embargo, existen métodos no destructivos que permiten evaluar algunas propiedades del concreto endurecido en el sitio tales como la densidad, contenido de humedad, permeabilidad, entre otros. El objetivo de estos métodos es no alterar la estructura original, por lo que pueden ensayarse repetidas veces.

Estos métodos también son aplicados en el control de calidad de construcciones nuevas debido a problemas generados en los diferentes procesos constructivos; en la evaluación de construcciones antiguas para su reparación o reconstrucción; y para garantizar la eficacia de sistemas de reparaciones en el concreto.

En la tabla 1, se muestran métodos no destructivos usados para encontrar algunas propiedades del concreto.

ASTM	METODO	RESUMEN	RESULTADOS
C805	Número de rebote	Se usa un martillo rebote el cuál impacta y rebota en el concreto.	Estimación de la resistencia, rigidez y dureza del concreto.
C803	Resistencia a la penetración	Se mide la penetración de una varilla o sonda en el concreto.	Estimación de la resistencia, rigidez y dureza del concreto.
C900	Ensayo Pull-out	Medición de la máxima fuerza necesaria para retirar un inserto de metal incrustado dentro del concreto.	Resistencia del concreto.
C873	Cilindros moldeados in situ	Técnica para obtener especímenes de losas en el sitio.	Varios (según ensayos de laboratorio).

Tabla 1: ensayos no destructivos en el concreto (parte 1).
Fuente: ACI 228.1R-03.

Sin embargo, en los últimos años se han perfeccionado métodos para evaluar el concreto con mayor eficiencia. Las principales condiciones analizadas en el concreto son: resistencia, homogeneidad, presencia de vacíos, dimensiones de elementos no expuestos, ubicación de fisuras, ubicación y diámetro del refuerzo interno, deterioro por congelamiento, incendio o agentes químicos, entre otros. La tabla 2 muestra los métodos no destructivos, realizados mediante el uso de ondas, y el uso de cada uno.

ASTM	ENSAYO	RESUMEN	RESULTADOS	DESVENTAJAS
C597	Ultrasonido	Análisis por medio de la propagación de pulsos de energía vibratoria en el concreto.	Estimación de la resistencia del concreto	Es necesario tener 2 lados opuestos para su análisis.
			Homogeneidad del concreto	
			Detección de vacíos en el concreto	
			Espesor del concreto.	
-	Pulso ECO	Detección de discontinuidades por medio de ondas transversales en	Detección de vacíos en el concreto.	
			Espesor del concreto.	
			Homogeneidad del concreto	
			Detección de vacíos en el concreto	
-	Radiometría	Se genera radiación por medio de un equipo sofisticado y un receptor de los resultados obtenidos.	Espesor del concreto.	Debido al uso de radiación, se debe tener cuidado en su uso.
			Homogeneidad del concreto	
			Detección de vacíos en el concreto	
			Otros	
-	Radiografía	Resultados fotográficos del interior del concreto por medio de rayos X y rayos gamma.	Homogeneidad del concreto	Equipo carísimo y es necesario utilizar un equipo de protección ante la radiación.
			Detección de vacíos en el concreto	
			Espesor del concreto.	
			Otros	
-	Equipos magnéticos y eléctricos	Detección de barras de acero debido al campo magnético producido por bobinas de estos equipos.	Detección de acero en el concreto (profundidad, espesor y ubicación)	
-	Tomografía infrarroja	Detección de anomalías en el concreto por medio de la emisión de radiación térmica y detectado por sensores infrarrojos.	Detección de vacíos.	Equipo carísimo y requiere de apropiadas condiciones ambientales.
			Otros	
D4748	Radar (GPR)	Emisión de ondas electromagnéticas a través del concreto (similar al pulso ECO)	Detección de vacíos.	No recomendable para detectar vacíos, ya que este tipo de ondas, no son reflectadas como el pulso ECO.
			Detección de acero en el concreto (profundidad, espesor y ubicación)	
			Otros	

Tabla 2: ensayos no destructivos en el concreto (parte 2).
Fuente: ACI 228.2R-98.

CAPITULO 3: EL PULSO ULTRASONÍCO Y EL PULSO ECO ULTRASONÍCO

3.1. EL SONIDO

3.1.1. DEFINICIÓN

El sonido es un fenómeno que involucra el flujo de energía sin el transporte de materia. Este flujo se da por medio de ondas mecánicas que se propagan por un medio sólido, líquido o gaseoso a través de vibraciones (sólo las ondas electromagnéticas se propagan por el vacío). Además, mientras el medio de transporte tenga mayor compresibilidad y/o menor densidad, la velocidad del sonido es baja, ya que la propagación implica que las moléculas del medio entren en compresión y tracción. Estas vibraciones producidas es lo que genera el sonido. Asimismo, la temperatura, el módulo de elasticidad y el módulo de Poisson del medio de propagación, afectan a la velocidad del sonido. La frecuencia de las ondas indica cuantas oscilaciones se produce por cada segundo que recorre el sonido. En la tabla 3 se muestra como se divide el sonido según su frecuencia.

FRECUENCIA	DETALLE
< 20 Hz	No escuchamos las frecuencias por debajo de 20 Hz. Son los infrasonidos . Aunque sí los sentimos, por ejemplo, las vibraciones que hacen temblar los cristales al pasar cerca un gran camión.
20 Hz a 250 Hz.	Frecuencias graves . Las que emite un tambor o un bajo eléctrico.
250 a 2.000 Hz	Frecuencias medias . La mayor parte de instrumentos musicales se desenvuelven en ellas, al igual que casi todas las voces humanas, aunque los varones tienden a las graves y las mujeres a las agudas.
2.000 a 20.000 HZ	Frecuencias agudas . Los platillos de la batería están dentro de este rango. Son esos tonos de algunas cantantes de opera que quiebran una copa de cristal.
> 20.000 HZ	Los ultrasonidos . Los humanos no los podemos escuchar, pero muchos animales sí.

Tabla 3: Rango de frecuencias.

Fuente: Introducción a la Psicoacústica de Federico Miyara.

La velocidad de la onda o del pulso longitudinal (en km/s o m/s), en caso de un medio uniforme, viene dada por:

$$L = V * T$$

Dónde:

V: Velocidad de la onda (metros/segundos)

L: Longitud del camino atravesado (metros)

T: Tiempo empleado por la onda para atravesar la longitud L (segundos)

El umbral de dolor es cuando la intensidad llega a los 120 dB o 1 W/m² (véase la tabla 5).

NIVELES DE INTENSIDAD DEL SONIDO	
200 dB	Bomba Atómica
180 dB	Cohete en despegue, volcán en erupción.
140 dB	Auto de fórmula 1.
130 dB	Avión al despegar.
120 dB	Motor de avión encendido.
110 dB	Concierto musical.
100 dB	Perforadora eléctrica.
90 dB	Tráfico, pelea de 2 personas.
80 dB	Tren.
70 dB	Aspiradora.
50/60 dB	Lavaplatos
40 dB	Conversación
20 dB	Biblioteca
10 dB	Respiración tranquila
0 dB	Sin sonido.

UMBRAL DE DOLOR

UMBRAL AUDITIVO

Tabla 5: niveles de intensidad del sonido
Fuente: Schuler, Charles A. Electrónica, principios y aplicaciones.

Por último, cuando las ondas se encuentran con otro medio diferente al de recorrido, parte de la onda lo atraviesa (refracción); otra parte lo rodea (difracción); y la última parte se refleja como eco (reflexión). La mayor parte de la energía de la onda puede rodear u atravesar obstáculos, siempre y cuando la dimensión de estos obstáculos sea menor a la mitad de la longitud de la onda, sin embargo, si este obstáculo es de mayor dimensión, la mayor parte de la energía será reflejada. En general, siempre que exista un obstáculo en la dirección de la propagación, parte de la energía es reflejada o atravesada en una cierta cantidad, es decir, si existe un obstáculo en el recorrido de la onda, se producirá refracción, difracción y reflexión.

3.1.3. IMPEDANCIA ACÚSTICA (Z)

La impedancia acústica es una propiedad de cada material que indica la resistencia que opone un medio a las ondas que desean atravesarla. Ésta se halla con la siguiente fórmula:

$$Z = \frac{P}{v}$$

Donde:

Z: Impedancia acústica (Pa*s/m)

P: Presión acústica (Pa) (J/s/m²) (watts/m²)

v: Velocidad de las partículas (m/s)

La impedancia acústica aproximada de algunos elementos se muestra en la tabla 6.

MEDIO DE PROPAGACION	AIRE	POLIESTIRENO EXPANDIDO	AGUA	MADERA	HORMIGÓN	ACERO	LADRILLO
IMPEDANCIA ACÚSTICA (Kg/(m ² /s))	408	0.01x10 ⁶	1.48x10 ⁶	0.4x10 ⁶	7x10 ⁶	46x10 ⁶	5x10 ⁶

Tabla 6: Impedancia acústica según el tipo de material.

Fuente: Acústica Fluidos y Termodinámica – E.U. Politécnica de Alicante.

Si una onda de sonido quiere propagarse por un material diferente al que se encuentra, el ratio entre las impedancias de los medios indica cuánto de energía fue reflejada, por lo tanto, si el ratio de impedancias es considerablemente alto, menor será la energía transferida al otro medio y por ende, mayor será la reflexión de la onda (eco).

La reflexión entre dos materiales se calcula de la siguiente forma:

$$R = \frac{(Z_1 - Z_2)}{(Z_1 + Z_2)}$$

Donde:

Z1: Impedancia del material 1.

Z2: Impedancia del material 2.

R: Reflexión entre los materiales.

Por ejemplo si una onda se desplaza en un medio de concreto y quiere atravesar un medio vacío (aire), entonces:

$$R = \frac{(7 \times 10^6 - 408)}{(7 \times 10^6 + 408)} = 0.99$$

Y en el caso del concreto y el poliestireno expandido:

$$R = \frac{(7 \times 10^6 - 11250)}{(7 \times 10^6 + 11250)} = 0.99$$

Se puede apreciar que los resultados son parecidos por lo que se puede asumir que una onda de ultrasonido en un medio de concreto al encontrarse con una zona vacía o de poliestireno expandido, la onda será reflejada prácticamente en su totalidad.

3.1.4. TIPOS DE ONDA

Las ondas sonoras se desplazan en todas las direcciones a partir de la fuente donde se generan. Estas ondas generadas son de varios tipos según su propagación y el medio donde se transmiten, y se dividen en:

a. ONDAS “P”

Llamadas también ondas longitudinales o de compresión. Este tipo de onda está asociada con la propagación del esfuerzo normal, ya que el movimiento de la onda se da paralela a la dirección de la propagación. Estas se propagan en toda clase de materiales.

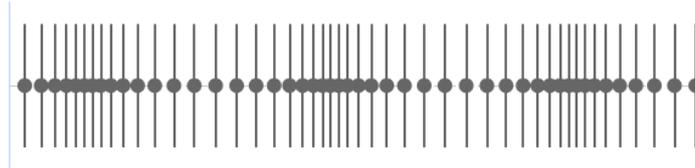


Figura 5: ondas “P”.

Fuente: Proyecto Educaplus, Jesus Peñas Cano.

b. ONDAS “S”

También llamadas ondas de corte o transversales. En este caso, las ondas son asociadas con los esfuerzos de corte, ya que el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de la propagación. Este tipo de ondas, solo se transportan en cuerpos sólidos, ya que los líquidos y gases no sufren esfuerzos de corte.



Figura 6: Ondas “S”.

Fuente: Proyecto Educaplus, Jesus Peñas Cano.

c. ONDAS SUPERFICIALES

Viajan a través de la superficie plana o curva de materiales sólidos y su penetración en estos es despreciable. Sufren atenuación al igual que las ondas longitudinales y transversales. Su velocidad es aproximadamente 90% de la velocidad de las ondas transversales en un mismo material.

3.2. ESTADO DEL ARTE

El ultrasonido fue descubierto hace mucho tiempo, cuando naturistas observaron que algunos insectos producían sonido al mover partes de su cuerpo unas con

otras y este no era detectado por los oídos del ser humano. También, es el caso de los murciélagos al producir una especie de sonido, el cual se refleja como eco en obstáculos y las presas que cazan. Sin embargo, fue a fines del siglo XIX que se puso empeño para estudiar estos fenómenos.

En 1917, Langevin creó los primeros transductores al hacer excitar cristales de cuarzo en un tubo vacío con corriente eléctrica. Él demostró que cuando a este material se le aplica electricidad cambiante, el cristal vibra y produce sonido; como también, al aplicar sonido al cuarzo, éste produce corriente eléctrica. Este fenómeno se denominó “piezoelectricidad”. Otros científicos trataron de utilizar otros materiales, sin embargo, ningún otro material era tan eficiente como el cuarzo.

En 1918, esta tecnología fue utilizada durante la Primera Guerra mundial para detectar submarinos enemigos por medio de ecos ultrasónicos. Ya en 1942, el ultrasonido fue utilizado en la Segunda Guerra Mundial en torpedos para ser guiados a su objetivo.

En la actualidad, se ha realizado importantes inventos usando el pulso ultrasónico, los cuales son usados en muchas ramas de investigación como: medicina, ingeniería, física, química, entre otros.

Posteriormente, se realizaron ensayos en el concreto endurecido, con el fin de encontrar sus propiedades, tales como: resistencia, rigidez, entre otros.

3.2.1. EL ULTRASONIDO EN EL CONCRETO

Después del conflicto de la II guerra mundial, fue en EE.UU donde se publicó el primer informe de mediciones de velocidad de pulsos generados de forma mecánica en el concreto (finales de la década de los 40). Aquí se mostró que la velocidad depende primordialmente de las propiedades elásticas del material y muy poco de la geometría.

Por el año 1950 se empezaron a utilizar las mediciones de velocidad del pulso ultrasónico como alternativa de pruebas no destructivas; esto con el fin de evaluar la calidad del concreto (técnica desarrollada por Leslie y Cheesman (Canadá)). También, otros investigadores realizaron estudios de correlación, entre el ultrasonido y las propiedades del concreto, para obtener así, modelos que permitan predecir la resistencia a la compresión axial del hormigón en base a la velocidad ultrasónica.

CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL CONCRETO POR MEDIO DE LA VELOCIDAD DE ONDA SEGÚN LESLIE Y CHEESMAN					
CALIDAD DEL CONCRETO	MUY POBRE	POBRE	REGULAR	BUENA	EXCELENTE
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/s)	< 2130	2130-3050	3050-3650	3650-4670	> 4570

Tabla 7: Clasificación de la calidad del concreto según Leslie y Cheesman.

CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL CONCRETO SEGÚN AGRAVAL			
CALIDAD DEL CONCRETO	POBRE	REGULAR	BUENA
VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (m/s)	< 2130	2500-3000	> 3000

Tabla 8: Clasificación de la calidad del concreto según Agraval.

Después de estas investigaciones, especialistas de diferentes Países comenzaron a estudiar las correlaciones entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia del concreto elaborado en su País (México – 2001, Perú – 2006, Argentina – 2009).

De todas las investigaciones se obtuvieron modelos diferentes, debido principalmente al carácter compuesto del material. Por ello, es necesario hacer estudios particulares según el tipo de agregados, cemento, aditivos, entre otros; que se utilizan en la región donde se desee aplicar la investigación.

Estos ensayos en el concreto, actualmente, se basan en las mediciones del tiempo de transmisión del pulso ultrasónico usando técnicas de transmisión, las cuales tienen una gran aceptación en todo el mundo. Es por ello que una gran cantidad de empresas producen comercialmente equipos de ultrasonidos, los cuales son adecuados para ser utilizados en obras y/o laboratorios.

Según algunos investigadores, cuando el concreto posee un módulo de Poisson de 0.2 se tiene una relación aproximada entre las velocidades de los 3 tipos de onda (véase tabla 9).

Relaciones relativas de velocidades de onda ($\nu=0.2$)			
Tipo de onda	Ondas P	Ondas S	Ondas R
Velocidad relativa	1	0.62	0.56

Tabla 9: Relaciones relativas de velocidades de onda ($\nu=0.2$).
Fuente: Impact Echo - IMCYC 2014.

3.3. PULSO ULTRASÓNICO

3.3.1. DEFINICIÓN Y CÓMO SE PRODUCE

Un pulso de vibraciones es producido por un transductor piezoeléctrico, el cual convierte la energía eléctrica en ultrasonido. En el caso del concreto, el pulso generado requiere de un material acoplante, grasa o vaselina, para ingresar o salir

del material. Esto se debe ya que los pulsos de vibración se reflejan en la cara de concreto endurecido, debido a la diferencia de impedancias entre el equipo, el aire y el concreto. Esta transmisión desarrolla un sistema complejo de ondas mecánicas que incluyen tanto a las ondas longitudinales, superficiales y las de cizallamiento (corte), los cuales se propagan a través del concreto.

Las primeras ondas que alcanzan el transductor receptor son las ondas P, que se convierten en una señal eléctrica en este (véase figura 7). Los circuitos de temporización electrónicos instalados en el equipo permiten medir el tiempo de tránsito del pulso.

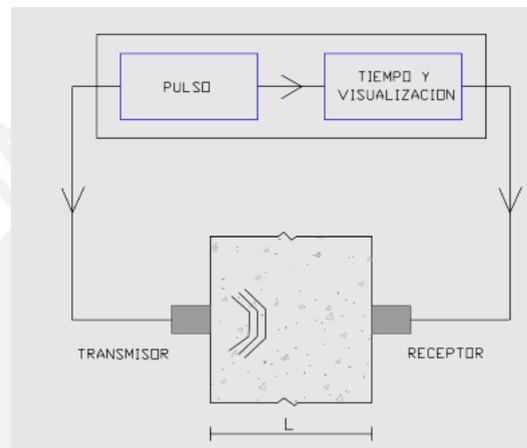


Figura 7: Diagrama del ultrasonido.
Fuente: Repositorio Institucional Pirhua.

Los transductores están contruidos con material polarizado, electrodos y cristales, los cuales pueden ser de cuarzo (con frecuencias estables pero pobres en generar energía acústica), de sulfato de litio (uso limitado a temperaturas menores a 75°C) o cerámicas sintetizadas (con tendencia al desgaste). La frecuencia generada es inversamente proporcional al espesor de los cristales, es decir, si la frecuencia requerida es mayor, menor será el espesor de los cristales utilizados en los transductores. Por último, el cabezal posee una lámina de fase que, además de proteger los elementos internos, permite que las ondas salgan en fase del transductor (véase figura 8).

Un transductor actúa como emisor o receptor, transformando la energía eléctrica en vibraciones mecánicas (sonido), o convirtiendo estas vibraciones en energía eléctrica. La energía se transporta por medio de cables coaxiales al equipo.

La energía es transportada en Watts, es decir en Joules por segundo. Sin embargo, la energía depende del voltaje producido y la intensidad de corriente transmitida.

$$P = I_n * V$$

Donde:

P: Potencia en Watts (J/s)

I_n: Intensidad de corriente (Amperios)

V: Voltaje (Voltios)

Además, el voltaje es igual a la intensidad por la resistencia de la carga en el circuito de entrada. Por lo tanto:

$$V = I_n * R$$

$$V = \frac{P}{I_n} * R$$

$$V = \sqrt{P * R}$$

Donde:

R: Resistencia de la carga (en Ohms:Ω)

Para terminar, se puede hallar la cantidad de decibeles producidos por el equipo con la siguiente fórmula:

$$dB = 20 \text{ Log} \left(\frac{V_{receptor}}{V_{emisor}} \right)$$

Donde:

dB : Intensidad del sonido medido en decibelios.

V_{emisor} : Voltaje producido por el equipo medido en voltios.

V_{receptor} : Voltaje que llega al receptor medido en voltios.

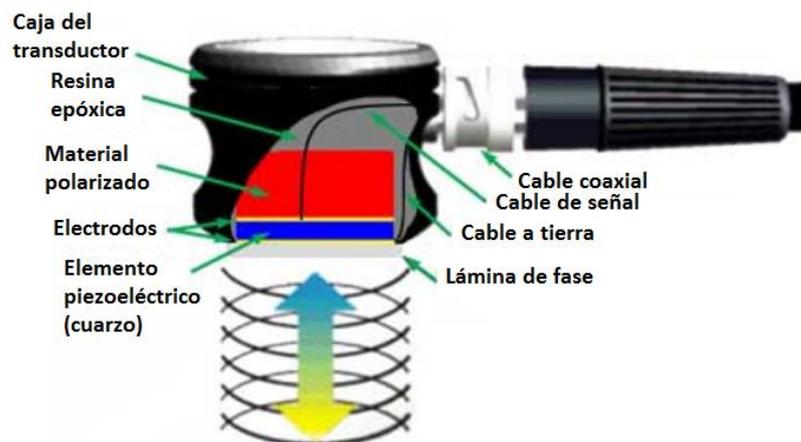


Figura 8: Esquema del transductor.
Fuente: Repositorio Institucional Pirhua.

3.3.2. ACOPLAMIENTO DE LOS TRANSDUCTORES

Para asegurar que los impulsos ultrasónicos, generados en los transductores de transmisión, pasen al concreto y luego sean detectados por el transductor receptor; es esencial que haya un acoplamiento acústico adecuado entre el concreto y la cara de los transductores. La mayoría de superficies de concreto, tienen un acabado casi plano por el uso de encofrados metálicos o lisos de madera; sin embargo, a pesar de tener una cara lisa, existe cierta rugosidad en las superficies y por ello, es necesario utilizar un conductor de por medio para así transferir la energía acústica de un medio a otro. Se puede utilizar vaselina, grasa, jabón suave, pasta de caolín/glicerol, entre otros, como acopladores. Es importante que la capa entre el concreto y la cara del transductor sea muy fina, ya que al ser de un grosor considerable, puede afectar los resultados. Por esta razón, se deben repetir lecturas del tiempo de tránsito hasta que se obtenga un valor que no varíe al análisis anterior.

Cuando la superficie de concreto es muy áspera y desigual para colocar el transductor, esta zona debe ser alisada y nivelada. Alternativamente, se pueden utilizar medios de alisado como resinas epóxicas de fraguado rápido o yeso, tomando en cuenta que estas deben garantizar una buena adhesión entre la superficie del concreto y el medio de alisado, para que así, el pulso se propague correctamente.

3.3.3. DISPOSICIÓN DE LOS TRANSDUCTORES

a. TRANSMISIÓN DIRECTA

Se debe utilizar este tipo de transmisión donde sea posible, ya que con esta disposición, la transferencia de energía entre transductores es la más óptima, por lo que la determinación de la velocidad depende sólo de la precisión en la medición de la longitud de trayectoria. El utilizar este método nos da una precisión mayor que al utilizar los otros tipos de transmisión (véase figura 9).

Se recomienda una longitud de trayectoria mínima de 150 mm para transmisión directa con superficies no moldeadas.

b. TRANSMISIÓN SEMIDIRECTA

El dispositivo de transmisión semidirecta tiene una sensibilidad menor a la directa, es decir, menor eficiencia en la transmisión de la onda. Es posible utilizar transductores que emitan señal de forma oblicua, y de este modo, obtener mejores resultados.

Se recomienda una longitud de trayectoria mínima de 400 mm para transmisión indirecta con superficies sin moldear.

c. TRANSMISIÓN INDIRECTA O DE SUPERFICIE

La transmisión indirecta se utiliza sólo cuando una de las caras del elemento de concreto es accesible, cuando la profundidad de una grieta superficial se va a determinar, o cuando sólo la calidad de la superficie del concreto sea de interés. Esta disposición es la menor sensible de todos los arreglos, sin embargo, esta proporciona mediciones de velocidad de pulso influenciadas por el concreto cerca a la superficie. Esta región es a menudo de diferente composición que la del concreto interno y los resultados de las pruebas puede no ser representativos del concreto en análisis. La velocidad indirecta es considerablemente menor que la velocidad directa en el mismo elemento de concreto. Esta diferencia puede variar entre 5 % a 20 %, dependiendo en gran medida de la calidad del concreto.

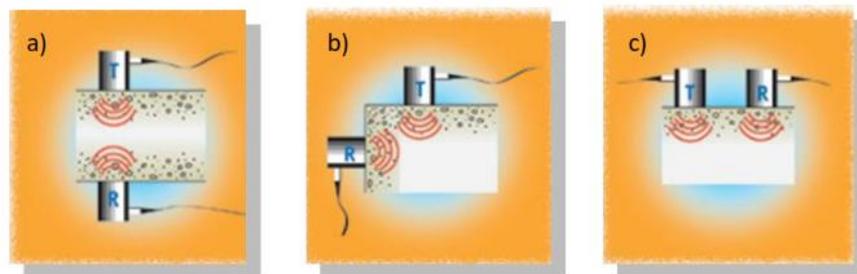


Figura 9: a) Transmisión directa b) Transmisión semidirecta c) Transmisión Indirecta
Fuente: Georadar y Ultrasonidos – Vicente Pellicer Llopis.

3.3.4. APLICACIONES

El equipo de ultrasonido tiene las siguientes aplicaciones:

- Determinación de la uniformidad del concreto.
- Medición de los cambios de la resistencia y durabilidad del concreto en el tiempo.
- Correlación de la velocidad del pulso y la resistencia del concreto.
- Determinación aparente del módulo de elasticidad.

La velocidad de un impulso ultrasónico está influenciada por las propiedades del concreto que determinan su rigidez elástica y resistencia mecánica. La variación obtenida en un conjunto de mediciones de velocidad de ultrasonido refleja la no uniformidad del elemento de concreto. Estas variaciones pueden ocurrir si en una región hubo una baja compactación, por lo que existe la posibilidad de que se tenga vacíos internos en dicha zona debido a la reducción en la velocidad del sonido. Los cambios en la estructura del concreto, debido a la maduración o

deterioro, se reflejan en un aumento o disminución, respectivamente, de la velocidad del pulso. Esto permite monitorear los cambios al hacer pruebas en intervalos de tiempo adecuados.

En el caso de pruebas mecánicas de muestras de control, es necesario extraer núcleos diamantinos de la estructura, sin embargo, las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico tienen la ventaja de que se relacionan directamente con el elemento vaciado, es decir, sin la necesidad de dañar el concreto.

3.3.5. EQUIPO

El equipo utilizado en esta investigación es el PROCEQ PUNDIT PL-200, el cual consta esencialmente de un generador de impulsos eléctricos con una capacidad de 0 a 400 V; transductores de onda P de 24, 54, 150, 250, 500 kHz, un amplificador interno con ganancias de 1 a 10000x; y un dispositivo electrónico de temporización, el cual permite medir el tiempo que demora la onda desde el emisor al receptor. En esta investigación sólo se utilizarán los transductores de 54 kHz, ya que estos son los más utilizados debido a la relación entre la longitud de onda y el tamaño máximo del agregado del concreto elaborado. En otras palabras, para que el agregado no afecte en el análisis, se debe cumplir la siguiente relación:

$$\frac{\lambda}{2} > TM$$

En nuestro caso:

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{v}{f} * \frac{1}{2} = \frac{3900 \frac{m}{s}}{54000Hz} * \frac{1}{2} = 0.036m = 36mm$$

Donde:

λ : Longitud de onda

TM: Tamaño máximo del agregado

v : Velocidad del ultrasonido en el material, en este caso consideramos 3900m/s.

Por lo tanto se puede utilizar esta frecuencia para analizar concreto hasta con un TM de 1”(25.4mm), siempre y cuando la velocidad bordee los 3900m/s. Tener en cuenta que si se utilizan transductores de mayor frecuencia, la longitud de onda crece, por lo que no se puede encontrar discontinuidades en el interior del concreto menores a $\lambda/2$.

El equipo es capaz de medir el tiempo de tránsito, a través del recorrido, con longitudes que van desde aproximadamente 100 mm hasta 3 m (con una resolución de $0.1\mu\text{s}$) o más (resolución de $1\mu\text{s}$) dependiendo del espesor del espécimen a analizar.

En general los pulsos de frecuencia alta tienen un inicio bien definido, y a medida que pasan por el concreto se atenúan más rápido que los pulsos de frecuencia más baja. Por lo tanto, es mejor utilizar transductores de frecuencia alta para longitudes de trayectoria corta, y transductores de frecuencia baja para trayectos largos. Se pueden usar frecuencias tan bajas como 10 kHz para trayectorias muy largas en el concreto y frecuencias tan altas como 1 MHz para morteros, lechadas o para longitudes muy cortas.

Los transductores con frecuencias de 50 kHz a 60 kHz son adecuados para la mayoría de aplicaciones en el concreto endurecido.

Las mediciones del tiempo de tránsito, en un mismo punto de un elemento ensayado, deben tener una precisión de $\pm 2\%$. Si los datos obtenidos son mayores a este porcentaje, deben ser descartados (ASTM C597).

Se puede analizar la velocidad de la onda conociendo el espesor del espécimen y el tiempo que demora la onda en atravesarlo.

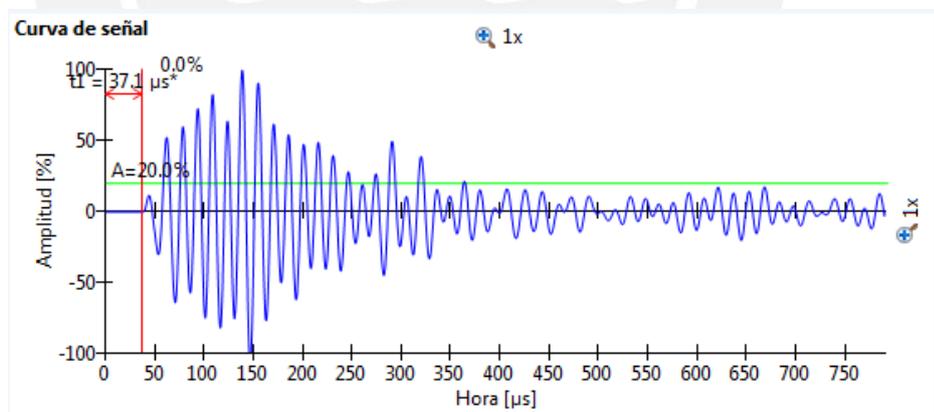


Figura 10: Curva de señal onda "P"

El tiempo se mide a partir de que el transductor receptor comienza a recibir energía, es decir, desde que la onda comienza a ganar amplitud (véase figura 10).

Por último, si se da el caso que el voltaje utilizado es insuficiente, se puede recurrir a un incremento de ganancia para amplificar los resultados que llegan al receptor. La ganancia en equipos sofisticado va desde los 1x hasta más de los 10000x. La ganancia solo es una amplificación de la onda, es decir, un zoom para

apreciar mejor los resultados. Es preferible, en el caso que las vibraciones en el receptor sean muy bajas, incrementar el voltaje en vez de la ganancia, para así tener un mejor resultado. Solo es recomendable el incremento de la ganancia cuando el máximo voltaje producido por el equipo sea insuficiente.

3.4. EL PULSO ECO

Al igual que el equipo de ultrasonido, este aparato funciona con ondas ultrasónicas, sin embargo, este equipo utiliza ondas transversales tipo eco para la detección de vacíos dentro del concreto; por lo que solo es necesario tener acceso a una sola cara para el escaneo. Asimismo, el equipo detecta el espesor de losas y muros de concreto por un solo lado, lo cual era poco probable con el ultrasonido convencional (véase figura 11).



Figura 11: Pulso ECO PROCEQ.
Fuente: PROCEQ S.A.

Mejoras en los métodos de eco ultrasónico para concreto

A partir de los años 90 se obtuvieron muchas mejoras en estos métodos como:

- Uso de frecuencias bajas (de 50 a 100 kHz).
- Uso de banda ancha (transmisión de datos simultáneos).
- Acoplamiento seco de los transductores.
- Transductores de punta.
- Uso tanto de ondas P, como de ondas S.
- Disponibilidad de métodos computarizados.
- Uso de transductores colocados y ordenados en arreglos (4x6, 4x10, 3x6, etc.).
- Procesamiento de señal digital.
- Uso de métodos de visualización (imágenes tomográficas, entre otros).

3.4.1. FUNCIONAMIENTO DEL PULSO ECO

Un equipo pulso eco generalmente usa transductores de punta, como se muestra en la figura 11. Además, no es necesario utilizar un gel de acoplamiento, ya que utiliza transductores de contacto en seco. Los transductores en seco son aquellos

que poseen una zona de contacto entre 1 a 2mm, por lo que debido a su menor tamaño, la colocación de acoplante no es necesaria.

- **Medición de ida y vuelta**

En el equipo de pulso eco, los transductores emisores y receptores están ubicados juntos en una misma cara del elemento analizado, por lo que el tiempo de viaje de la onda se medirá de ida y de vuelta, entonces este tiempo se divide entre dos para hallar la distancia recorrida (véase figura 12).

Por lo mencionado en el párrafo anterior, se usa la siguiente fórmula:

$$T = V \times \frac{\Delta t}{2}$$

Donde:

T: Distancia donde se produce el eco (m).

V: Velocidad de la onda en el material (m/s).

Δt : Tiempo de ida y vuelta de la onda (s).

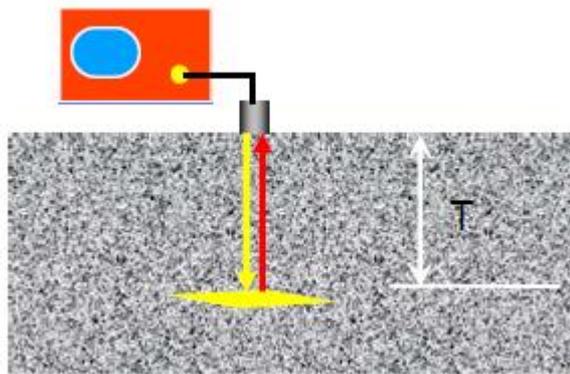


Figura 12: Eco de onda "S".

Fuente: Presentación "Stress-Wave Methods for Concrete Structures" (Carino, N.J.)

- **El haz ultrasónico**

El haz ultrasónico emitido se suele considerar con un ancho constante en toda su longitud, lo cual no es real, ya que poseen tres zonas: zona muerta, zona de campo cercano y zona de campo lejano (véase figura 13).

El ángulo mostrado en la figura 13, " ϕ ", es conocido como "ángulo de divergencia", el cual indica la expansión cónica de la onda longitudinalmente. Todo equipo es construido con un diferente ángulo de divergencia, esto se da ya que se desea controlar el trayecto de la onda y así evitar, parcialmente, que imperfecciones muy cerca de la zona analizada afecten los resultados.

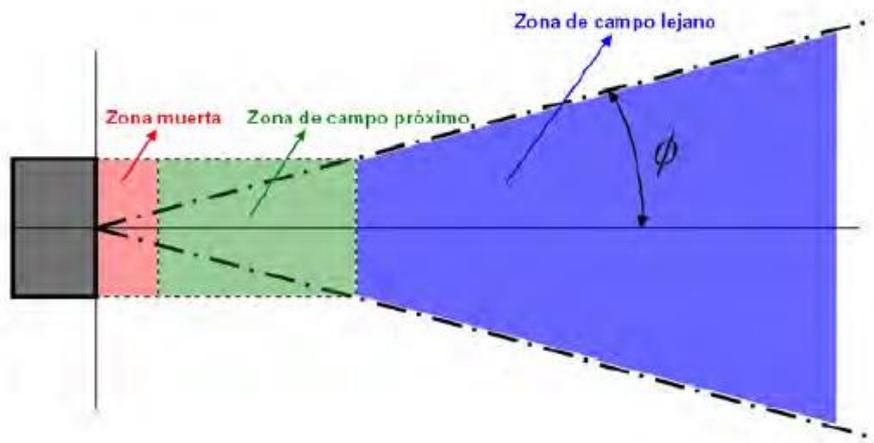


Figura 13: Diagrama del haz ultrasónico.

Fuente: Chequeo de Estructuras de Hormigón Armado – Jesús Herminio Alcañiz Martínez.

a. Zona Muerta

Es la zona cercana al eco de emisión, el cual impide localizar heterogeneidades a poca distancia de la superficie de contacto. Esto se debe a las interferencias producidas por las vibraciones del cristal, ya que al ser menor el tiempo de recorrido de la señal que la excitación del cristal, se da una interferencia por la emisión ultrasónica del transductor. La zona muerta, por lo general se detecta por el eco de entrada producido, es decir, una amplitud en la señal de tamaño considerable. Cada transductor y cada equipo tienen diferente construcción, por lo tanto, el tamaño de esta zona es variable.

b. Campo Próximo, Cercano o Zona de Fresnel

Desde el punto de origen, la energía se irradia en todas las direcciones y la amplitud de presión acústica toma valores máximos y mínimos, produciéndose interferencia en el campo ultrasónico.

La forma del haz ultrasónico se propaga de forma cónica, pero aparecen zonas donde la intensidad cambia por efectos de entrada de las ondas de cada transductor, es decir, debido a la combinación de todas las ondas emitidas ocurre una interferencia. Este efecto, dificulta la detección de las heterogeneidades en esta zona por las múltiples combinaciones. Este campo es conocido como campo cercano y la señal aquí es inestable hasta que en un momento la señal se regula. Tener en cuenta que los resultados obtenidos en esta zona no son confiables (véase figura 14).

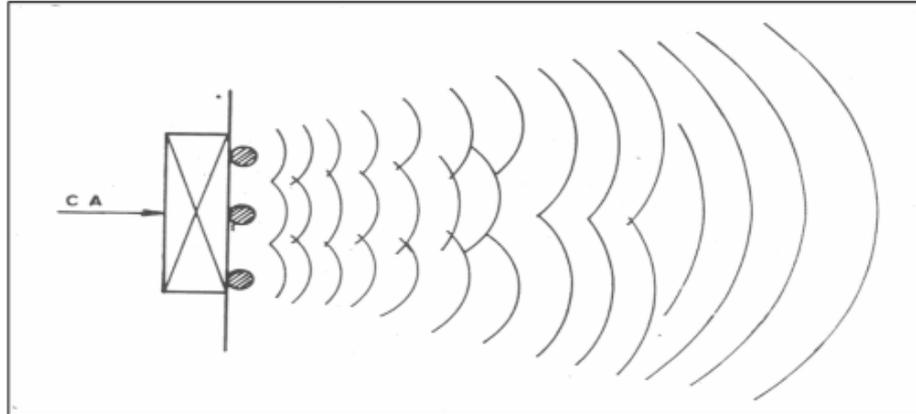


Figura 14: Vibración y generación de ondas individuales.

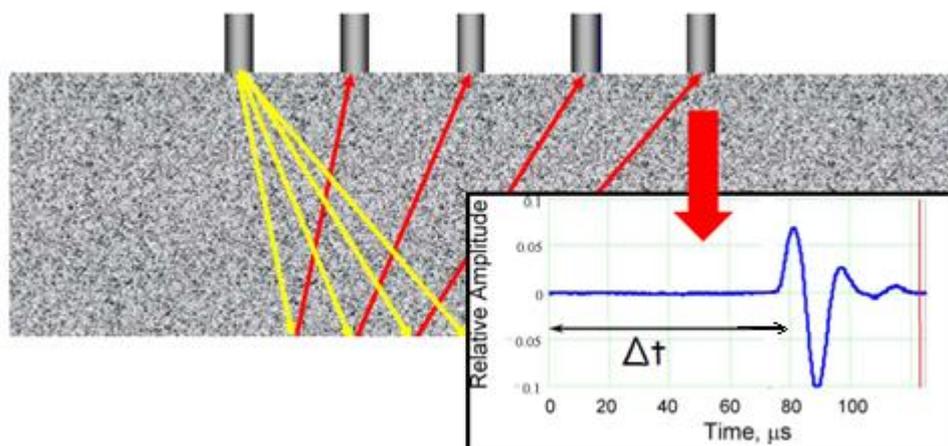
Fuente: Instituto Politécnico Nacional. México.

c. Campo Lejano o Zona de Fraunhofer

Esta zona es continua y diferente a la del campo cercano, ya que aquí se estabiliza la presión acústica. En esta zona el área que cubre el haz aumenta con la distancia, como también la energía acústica se dispersa porque el área del haz ultrasónico se abre en forma de un cono, por lo tanto se produce el efecto de atenuación.

- **Transductores de punta y contacto seco (Ondas S)**

Las ondas S producen reflexiones más fuertes que las ondas P debido a que estos no se transmiten en vacíos. Estos transductores no necesitan acoplante y tienen resortes para ajustarse a la superficie.



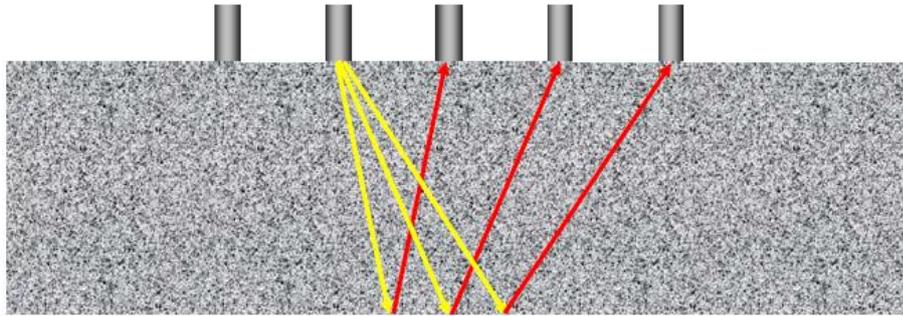


Figura 15 y 16: Funcionamiento del pulso eco (parte 1)
Fuente: Presentación “Stress-Wave Methods for Concrete Structures” (Carino, N.J.)

El arreglo de los transductores permite realizar varias mediciones del tiempo de viaje de la onda, por lo que se recoge una gran cantidad de datos que permite reconstruir el interior del objeto que se está analizando (véase figura 15 y 16).

- **Regiones donde se detectan fallas**

Se detectan las fallas que están en las regiones de campo cercano o lejano; como se indicó anteriormente, no son confiables los resultados del campo cercano. Tener en cuenta que en casos de imperfecciones de gran tamaño, la energía de la onda es reflejada en gran cantidad de la imperfección (véase figura 17 y 18).

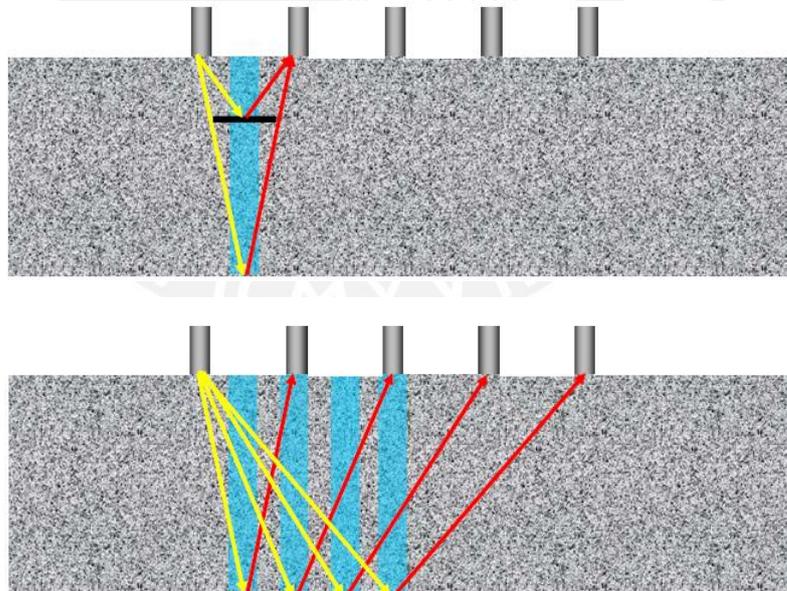


Figura 17 y 18: Funcionamiento del pulso eco (parte 2).
Fuente: Presentación “Stress-Wave Methods for Concrete Structures” (Carino, N.J.)

La falla se detecta por varios pares de transductores que trabajan en conjunto para ubicar la discontinuidad (véase figura 19).

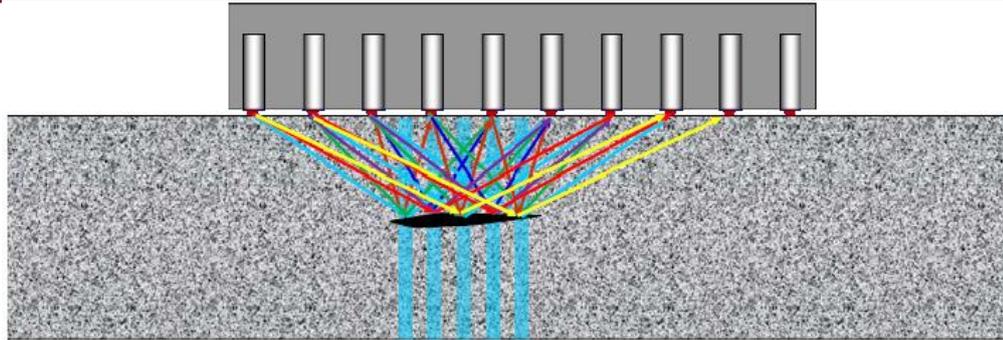


Figura 19: Funcionamiento del pulso eco (parte 3).

Fuente: Presentación “Stress-Wave Methods for Concrete Structures” (Carino, N.J.)

• **Cálculo de la profundidad donde se produce el rebote**

Según la figura 20, se conocen las distancias x_{i-j} entre los pares de transductores. La profundidad donde se produce el reflejo se calcula a partir de la medición del tiempo de viaje de la onda entre un par de transductores de la siguiente manera:

$$d_{i-j} = \sqrt{(e)^2 - \left(\frac{x_{i-j}}{2}\right)^2}$$

$$e = V \times \frac{\Delta t_{i-j}}{2}$$

Donde:

d_{i-j} : Profundidad donde se produce el rebote (m)

V : Velocidad de la onda (m/s)

Δt_{i-j} : Tiempo de viaje de la onda entre un par de transductores (μs)

x_{i-j} : Distancia entre los pares de transductores i-j (m)

e : Distancia recorrida de la onda (e_1+e_2).

Como se ve en la figura 20, con el tiempo de viaje de la señal se calcula la profundidad de rebote. Para cada par de transductores, la señal se asocia al rebote que se da en el punto medio entre los transductores (producido por una falla, vacío, o simplemente por el espesor final del elemento).

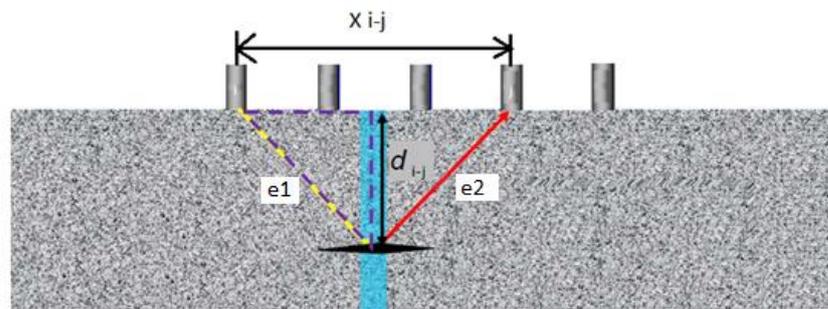


Figura 20: Funcionamiento del pulso eco (parte 4)

Fuente: Presentación “Stress-Wave Methods for Concrete Structures” (Carino, N.J.)

- **Reconstrucción de la imagen**

Al unir todas las combinaciones entre transductores se genera una imagen del interior del elemento en estudio en dos dimensiones, más conocido como scan-B, la cual está ordenada por píxeles (véase figura 21).

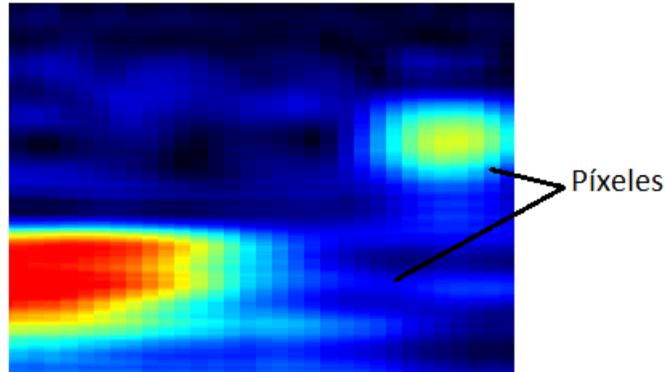


Figura 21: Scan-B.

Para mejorar la reconstrucción de la imagen captada se usa una técnica de focalización de apertura sintética, la cual usa la información de longitud de recorrido y de posicionamiento para corregir la imagen. Esta técnica se llama SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) y la calidad de imagen que brinda depende de la distancia entre las mediciones (a menor distancia mayor calidad de imagen).

Otro ajuste que brinda el equipo para mejorar la imagen es la función “Envelope” que usa una envoltura de lo escaneado para mejorar la imagen del Escaneado B (véase figura 22).

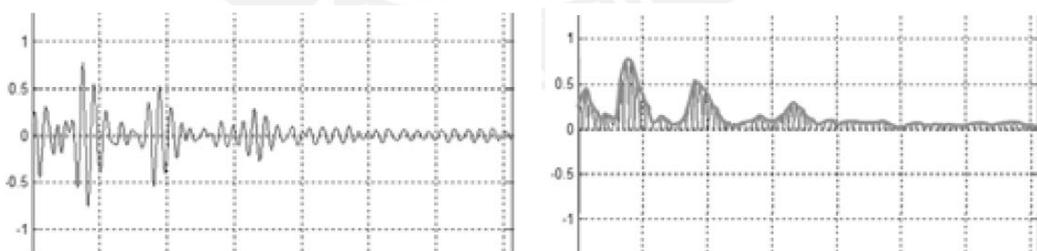


Figura 22: Ejemplo de la señal original y la señal con envoltura.
Fuente: Manual de PROCEQ (PUNDIT PL-200PE)

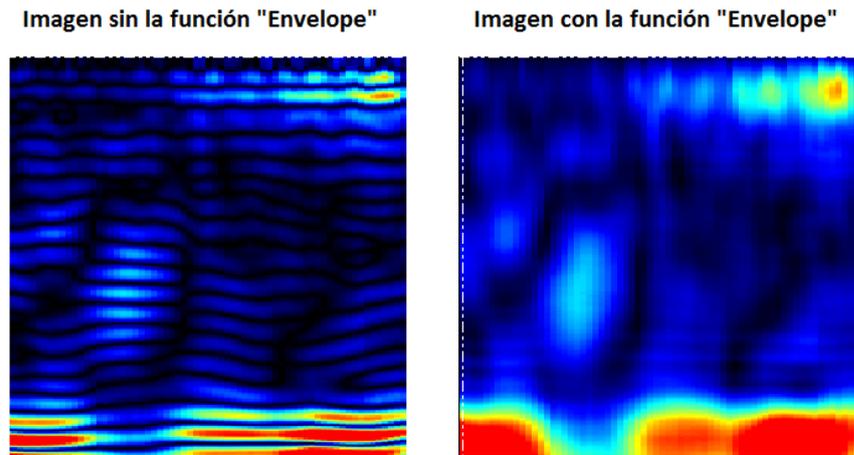


Figura 23 y 24: Función Envelope – pulso eco PROCEQ.

En la figura 23 y 24, se muestra como se ve una imagen del scan-B, generada por el equipo luego de una medición, cuando se usa la función “Envelope” y la otra cuando no se utiliza. Las zonas marcadas de celeste en el scan-B corresponden al lugar donde se producen los rebotes o donde se refleja la señal. Estas zonas son asignadas con colores que indican la intensidad de su reflejo (superposición constructiva). A más coloración rojiza, mayor es la recepción de la energía emitida. El análisis de los gráficos en 2-D y la detección de los vacíos dependerán en gran medida de la experiencia del operador, ya que este elegirá la ganancia de colores adecuada en cada ensayo. Esta ganancia se puede variar desde un valor de 1 hasta un valor de 10, para que así, los posibles vacíos o puntos de rebote de la señal se visualicen de mejor manera.

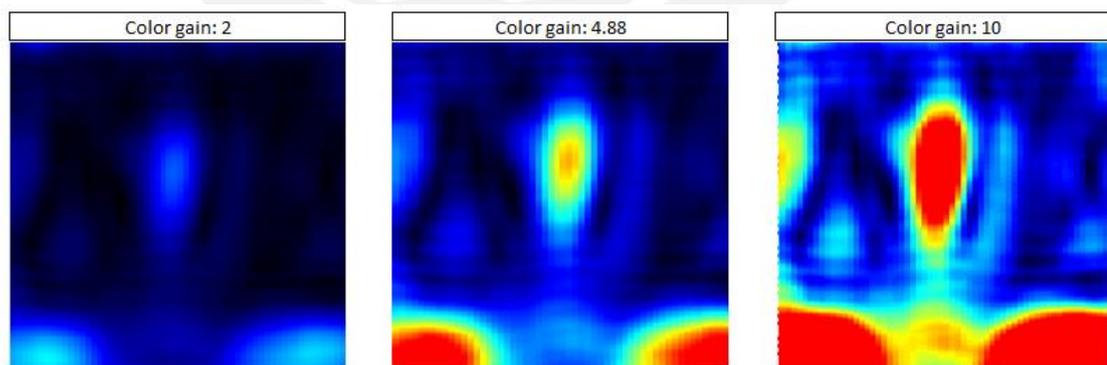


Figura 25: Ganancia de color – pulso eco PROCEQ.

En la figura 25, se verifica un mismo escaneo correspondiente a un espécimen de concreto con vacíos internos. La figura muestra el mismo scan-B pero con tres ganancias de color diferentes. Como se aprecia para este ejemplo, con una ganancia de color de 4.88 se puede apreciar mejor uno de los vacíos del elemento,

e incluso desaparece una zona en la parte inferior por falta de energía del espesor final, el cual suele suceder cuando se detecta un vacío.

3.4.2. APLICACIONES

- **Velocidad de Onda S**

Análisis de la velocidad por corte en el material escaneado.

- **Detección de vacíos**

Conductos vacíos, como huecos o fisuras dentro del concreto, son registrados debido a la reflexión de las ondas. Esto sucede por la alta diferencia en impedancia entre el concreto y el aire. Se recuerda que para que esto se logre, el vacío debe ser mayor a la mitad de la longitud de la onda ultrasónica.

Este método requiere de la confirmación de los resultados, con el equipo de ultrasonido (método directo) o con métodos invasivos (extracción de núcleos de concreto) para así, asegurarse de que éstos vacíos existan en el elemento de concreto.

- **Espesor de losas y muros de un solo lado**

Debido al cambio de impedancias entre dos materiales, el ultrasonido puede detectar el espesor de un material analizado. Debido a que el espesor final de rebote es de un área considerable, la mayor parte de la energía que ingresa al concreto es reflejada y registrada por el receptor.

- **Espesor de concreto dañado de un solo lado**

Al igual que el pulso eco puede detectar el espesor del concreto, también es capaz de encontrar el espesor de concreto dañado por deterioro, fuego, hielo y deshielo, entre otros. Esto se da ya que parte de la energía transmitida refleja entre el concreto dañado y no dañado.

3.4.3. EQUIPO

Para el escaneo con ondas de pulso eco, se utilizó el equipo PROCEQ PUNDIT PL200PE. La cara de escaneo del equipo tiene 16 cm de longitud y 11 cm de ancho. El equipo cuenta con 9 emisores y 9 receptores que funcionan como transductores de punta, por lo que no es necesario utilizar un acoplante. En la figura 26 y 27, se aprecia que en la cara de los transductores, los receptores se ubican en los primeros 8 cm y en los otros 8 cm restantes, los emisores.



Figura 26 y 27: Vista frontal y posterior del equipo pulso eco.

La toma de datos para un scan-B es realizado de izquierda a derecha. En la figura 28 se aprecia el escaneo con el equipo de pulso eco, el cual comienza en el extremo izquierdo del elemento de concreto, para luego terminar el análisis al llegar al extremo derecho.



Figura 28: Manipulación del equipo pulso eco.

Tener en cuenta que no necesariamente el análisis escaneado tiene un ancho idéntico a 11cm (el ancho del equipo), sino, este ancho de análisis puede ser mayor, ya que las ondas emitidas se propagan de forma cónica.

a. LONGITUD DE ONDA

Este equipo de pulso eco usa transductores de 50 kHz. Para que el agregado no afecte en el análisis, se debe cumplir la siguiente relación:

$$\frac{\lambda}{2} > TM$$

En nuestro caso:

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{v}{f} * \frac{1}{2} = \frac{\frac{2100m}{s}}{50000Hz} * \frac{1}{2} = 0.021m = 21mm$$

- λ : Longitud de onda
 TM: Tamaño máximo del agregado (en nuestro caso $\frac{3}{4}$ "=19.05 mm)
 v : Velocidad de la onda S en el material, en este caso consideramos 2100m/s.

Por lo tanto se puede utilizar esta frecuencia para analizar concreto hasta con un TM de $\frac{3}{4}$ " (19.05 mm), el cual, es el tamaño máximo del agregado que se utilizará para las mezclas de concreto.

b. SEPARACIÓN ENTRE TOMA DE DATOS – SCAN B

Para analizar una franja de ancho 11 centímetros, se debe primero elegir la distancia de separación entre los datos tomados para el scan B. Esta separación puede ser de 1 cm, 2.5 cm o cualquier valor que se desee. Si se elige una distancia bien pequeña, se tendrá una mayor cantidad de datos, por lo que el gráfico del scan B será de mejor calidad. Para escaneos con buena resolución, se recomienda usar distancias entre mediciones de 1 cm, por otro lado, para escaneos en elemento de mayor tamaño se puede utilizar 2.5 cm o más como distancia entre mediciones. Si se quiere detectar objetos como delaminaciones, grosores diferentes, u otras imperfecciones de gran tamaño, se puede usar un espaciamiento de 5 cm o más.

En nuestro caso se está utilizando 0.5 cm de distancia para así obtener un gráfico con mayor resolución. El motivo de este espaciamiento es que se desea encontrar vacíos de distintos tamaños, desde muy pequeños (1.4 cm), hasta los de tamaño considerable (10 cm).

c. ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ONDA S

En caso de que no se conozca el espesor de un espécimen de concreto, el equipo cuenta con una opción para la estimación de la velocidad de onda S. Para ello utiliza los 9 emisores y los 9 receptores, para así realizar una combinación de transmisiones indirectas o de superficie (Capítulo 4.2.3.c). En el caso de que si se conozca el espesor del espécimen, utilizar el modo "escaneo de velocidad" del equipo, el cual por medio del espesor del material y el tiempo de vuelo, analiza la velocidad del pulso ultrasónico.

d. MODOS DE OBTENCIÓN DE DISCONTINUIDADES

Para el caso de análisis de discontinuidades, existen dos maneras de encontrar un vacío: "el primer caso", cuando las ondas ingresan al concreto, se reflejan en la

discontinuidad y llegan al receptor del equipo; y “el segundo caso”, cuando las ondas ingresan al concreto, se reflejan en la discontinuidad, pero éstas no llegan al receptor del equipo. En esta segunda opción, sólo se puede ubicar un vacío si este interfiere en el escaneo del espesor del fondo de esta zona, por lo que en ese pequeño rango el fondo tendrá una coloración azulada.

En la figura 29, en el escaneo inferior se aprecia a detalle el vacío en forma de cubo (primer caso), sin embargo, en el escaneo superior se verifica un vacío en la zona del fondo del espesor (segundo caso). En los análisis realizados en esta tesis, se tomarán en cuenta estas pérdidas de energía en el fondo, por lo que los materiales encontrados con el segundo caso, serán resaltados de color VERDE.

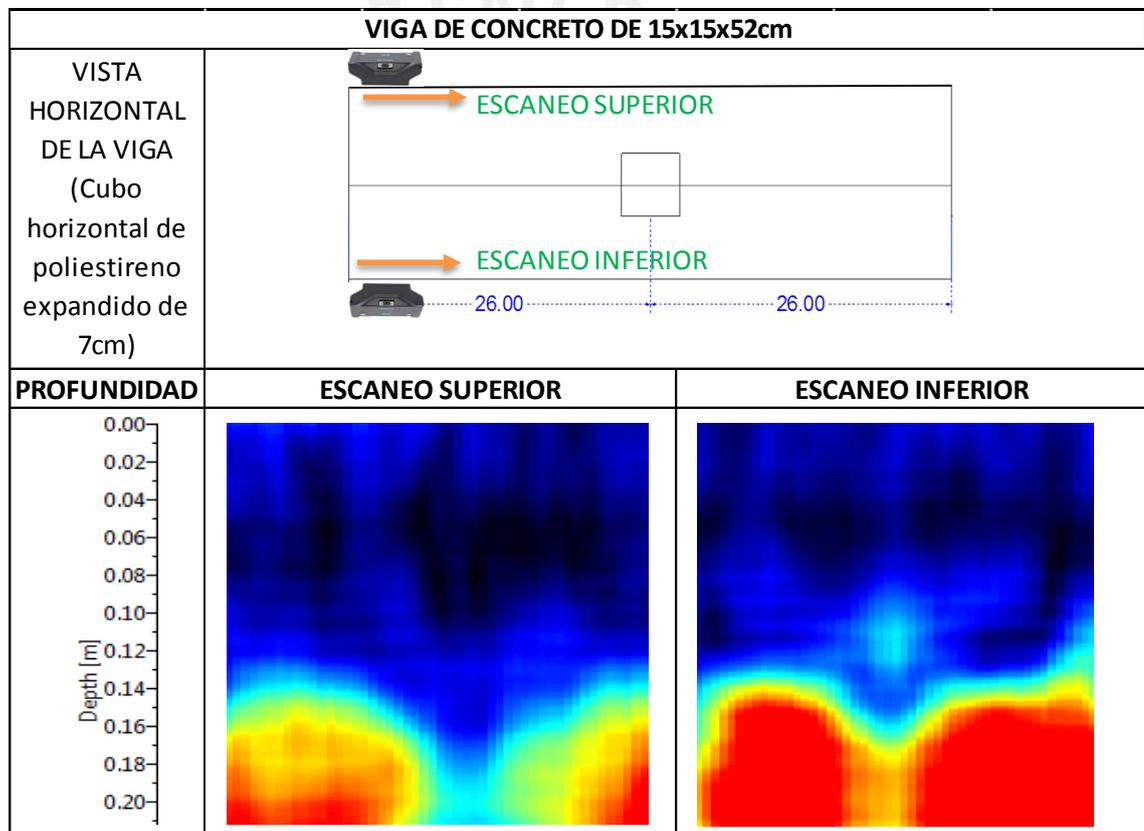


Figura 29: Modos de obtención de discontinuidades – pulso eco.

e. COMPENSACIÓN HORIZONTAL

La compensación horizontal es la dimensión dada por un operador, cuando este inicia o termina el escaneo de una franja de concreto. La idea de esta compensación es de alejarse de las caras transversales del espécimen, ya que estas pueden funcionar como medios de reflexión de las ondas; y por lo tanto, tener ecos de entrada de la señal de gran amplitud (véase figura 30).

Por ello, cuando se realice un scan-B, lo ideal es alejarse por lo menos unos 11 centímetros de las caras laterales, es decir 8 centímetros de la mitad del equipo más 3 centímetros adicionales (las mediciones de los transductores siempre se promedian en la parte central del equipo).

Por otro lado, si no se tiene un borde inicial y final que afecten las lecturas, no es necesario realizar este procedimiento.

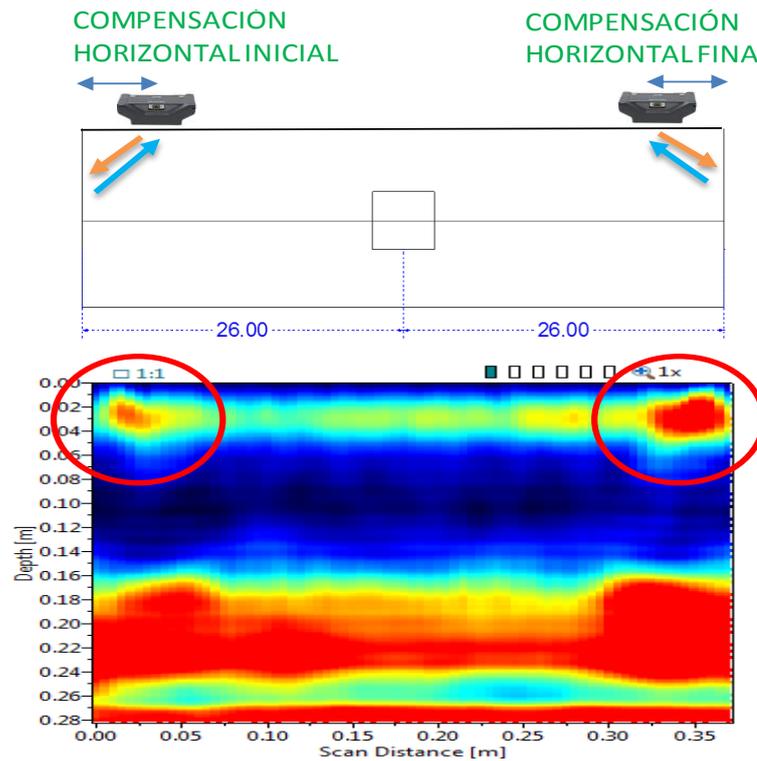


Figura 30: Compensación horizontal.

f. ZONA MUERTA Y CAMPO CERCANO

Para analizar la zona muerta y campo cercano se utilizan las señales de onda S de los resultados. La zona muerta es aquella distorsión producida por el eco de entrada, por lo que la amplitud en los primeros centímetros de profundidad del scan-B es alta. El campo cercano comienza desde la amplitud alta de la zona muerta, hasta donde la señal se regula (véase figura 31).

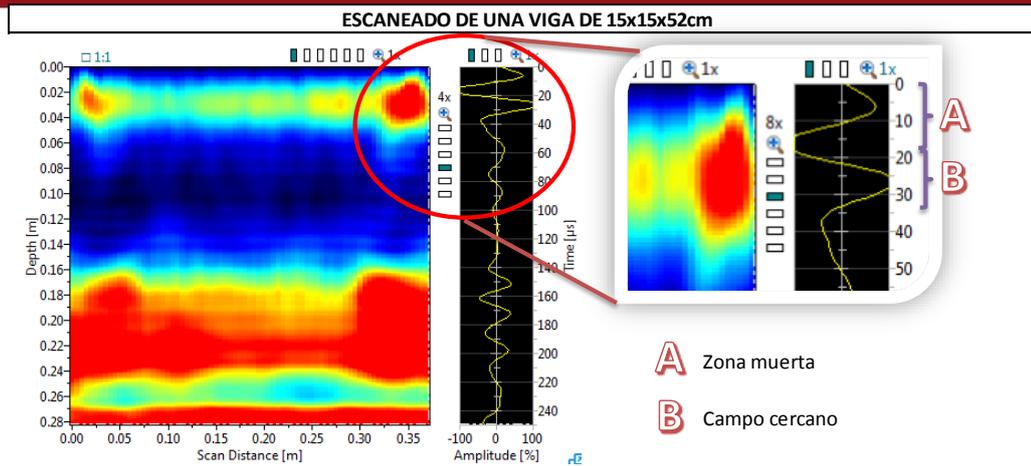


Figura 31: Zona muerta y campo cercano.

Debido al alto eco de ingreso de la onda al espécimen de concreto, el equipo lo reconoce como una llegada de energía al receptor, y es por eso que esta zona es en algunas ocasiones de color amarillento hasta rojiza. Como se aprecia en la figura 31, la zona muerta va desde el inicio de la señal hasta la amplitud máxima producida (A). Por otra parte, el campo cercano inicia de la amplitud máxima, hasta donde la señal se estabiliza (B). Debido a que no se utiliza ningún tipo de acoplante y además de que el espécimen de concreto puede tener superficies no lisas en su totalidad, el eco de entrada puede tener una dimensión considerable. Estas dos zonas pueden o no aparecer, como coloración rojiza o amarillenta, ya que esto depende de la cantidad de energía perturbada que no ingresó al material. Tener en cuenta que mientras la ganancia de colores del equipo aumenta, la coloración de esta zona también se torna más rojiza.

Por otra parte, también en la figura 31 se aprecia que estas zonas crecen en el comienzo y finalización de la toma de datos. Esto se debe, ya que este análisis tuvo una baja compensación horizontal, y las ondas se vieron reflejadas en las caras transversales de esta viga causando un incremento de la dimensión de la zona muerta.

g. ESCANEADO DEL ESPESOR

En la figura 32, se aprecia cómo se determina el espesor de un elemento utilizando las amplitudes máximas de las señales de cada escaneo. Esta amplitud de la señal indica la zona donde se realizó la reflexión de las ondas emitidas. En la figura 32 se marca la recepción de la onda, por un punto de coordenadas con líneas punteadas (de color blanco). En este ejemplo se aprecia que el espesor escaneado del elemento es de 0.163 m o 16.3 cm.

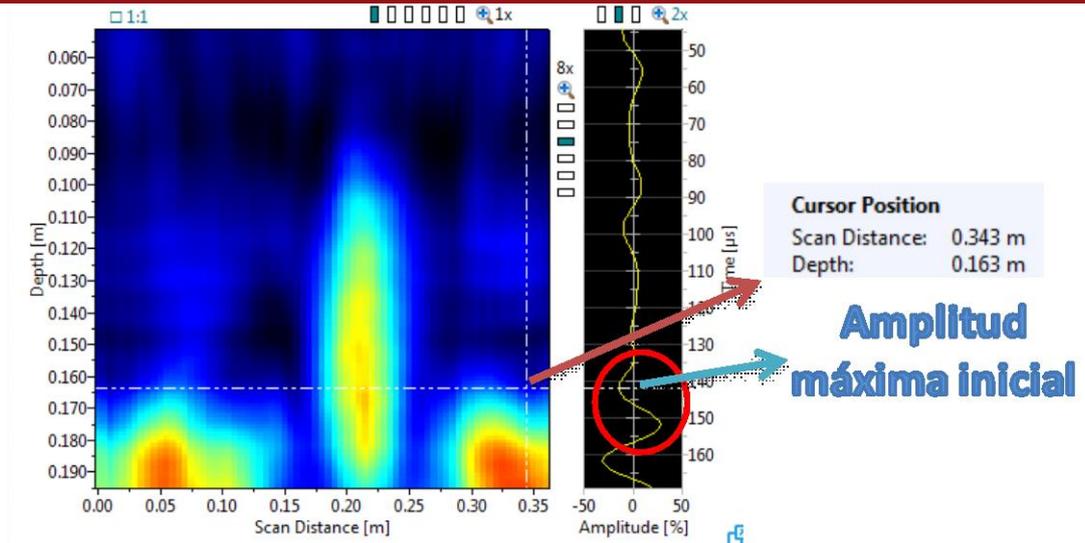


Figura 32: Escaneo del espesor del espécimen

h. ESCANEO DEL RECUBRIMIENTO Y DISTANCIA HORIZONTAL DEL VACÍO

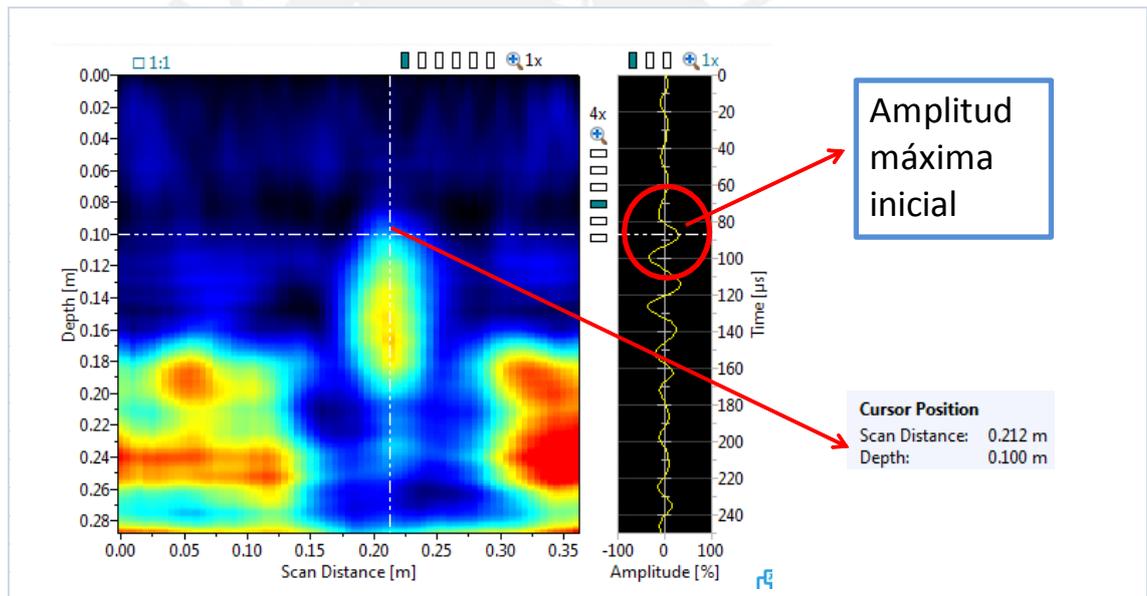


Figura 33: Ubicación de discontinuidades

Para determinar la distancia escaneada horizontal, se fija el punto de coordenadas, de líneas blancas punteadas, en la máxima amplitud inicial, el cual casi siempre es el punto más alto del vacío graficado por el equipo. Esto sucede siempre y cuando el operador haya elegido una intensidad de ganancia de colores adecuada (véase figura 33).

Tener en cuenta que en el caso de los especímenes de concreto que se fabricaron, debido a las caras transversales de inicio y de fin, se utilizará una compensación horizontal. En la figura 33, se ubica el vacío a una distancia de 21.2 cm desde el inicio del escaneo, sin embargo, a esta dimensión se le debe de sumar la distancia

de la compensación horizontal realizada. En el caso de que el equipo se haya ubicado completamente al borde del espécimen, se tendrá una compensación horizontal de 8 centímetros (la mitad de la longitud del equipo pulso eco). Por ende, el vacío se localiza a $21.2+8=29.2$ cm desde el extremo izquierdo de la cara transversal del elemento.

Para determinar el recubrimiento del vacío se observa la amplitud máxima inicial de la señal en el eje vertical del vacío. En la figura 33, el recubrimiento del vacío escaneado es de 10 cm.

i. ANCHO DEL VACÍO APROXIMADO

El ancho del vacío se analizó directamente de la gráfica del scan B, por lo que los resultados son de referencia. La gráfica se acomodó por medio de la gama de colores del equipo y también, con las ondas escaneadas en cada medición.

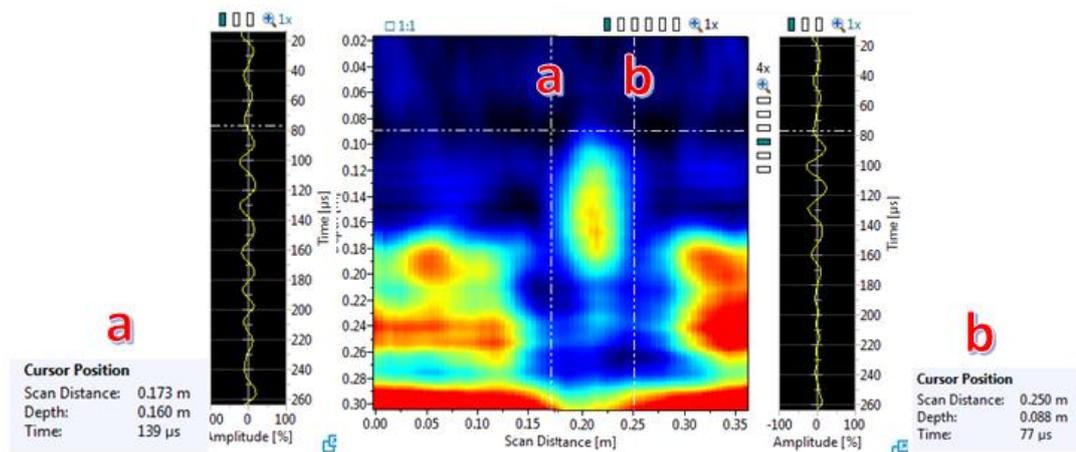


Figura 34: Ancho de vacíos (aproximado)

Por ejemplo, en la figura 34, los puntos “a” y “b” son las zonas donde la amplitud de la onda S comienza a incrementarse y disminuir respectivamente. Por lo tanto se resta las distancias escaneadas de “b” y “a” para hallar el ancho aproximado del vacío. En este caso: $0.250\text{m} - 0.173\text{m} = 0.077\text{m}$, es decir, el vacío posee un ancho de 7.7 centímetros.

Este cálculo es un adicional a la tesis y depende altamente de la experiencia y observación del operador que efectúa el ensayo, por lo que no es de gran exactitud.

CAPÍTULO 4: RECURSOS NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE LOS ENSAYOS

Los agregados y las bolsas de cemento fueron proveídos por UNIÓN DE CONCRETERAS S.A.C. (UNICON) y UNIÓN ANDINA DE CEMENTOS S.A.A. (UNACEM) respectivamente. Los equipos, herramientas y otros, fueron facilitados por el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la PUCP, donde también en este lugar, se realizaron todos los ensayos respectivos.

4.1. INSUMOS PARA MEZCLA DEL CONCRETO

- **Cemento Portland tipo I.**

El cemento utilizado es de la marca SOL tipo I, el cual es uno de los más vendidos a nivel nacional. El peso específico del cemento es de 3.11kg/cm³. Para mayor información de la calidad y características del cemento, véase el anexo 03.

- **Agregado grueso.**

El agregado grueso proviene de la cantera Jicamarca de huso 67, es decir, piedra con tamaño máximo nominal de ¾". Véase el anexo 02.01 para más detalles del agregado.

- **Agregado fino.**

Este agregado también es procedente de la cantera Jicamarca. Tener en cuenta que la arena fue facilitada lavada, ya que con este método, UNICON reducía la cantidad de finos del agregado. Las características de este agregado se encuentran en el anexo 02.02.

- **Agua**

Se utilizó agua potable en el desarrollo de las mezclas, el cual cumple con los requerimientos de la NTP 339.088.

- **Aditivo reductor de agua.**

Se evaluaron dos tipos de aditivos, uno plastificante reductor de agua y otro superplastificante, con el fin de escoger el más conveniente:

- POLYHEED 770R: Fabricado por la empresa BASF. Este aditivo es uno de los más utilizados por las empresas concreteras a nivel nacional. Este aditivo permite una mejor trabajabilidad en el concreto fresco, trabaja como retardante

inicial, reductor de agua de rango medio, entre otras características. Se utiliza en proporción de 250 a 550ml por cada 100kg de cemento. Para mayor información Véase la ficha técnica del aditivo en el anexo 04.01.

- NEOPLAST MR500: Fabricado por QUIMICA SUIZA. El NEOPLAST trabaja como un plastificante y superplastificante según la cantidad que se añada a la mezcla. En dosis de 0.3 a 0.7% del peso de cemento, este trabaja como plastificante; y en dosis de 0.7 a 1.5% como superplastificante. Entre sus beneficios, este aditivo mejora la trabajabilidad, labores de acabado, tiempos de fraguado, resistencia, entre otros. Para más información del aditivo vea la ficha técnica en el anexo 04.02.

4.2. EQUIPO DE ULTRASONIDO

Los equipos de ultrasonido utilizados fueron el PUNDIT PL-200 y el PUNDIT PL-200PE, los cuales son equipos sofisticados usados por un gran grupo de compañías extranjeras. A medida que pasa el tiempo, las empresas fabricantes de estos equipos han optimizado los niveles de confiabilidad, precisión y uso del equipo. Ambos equipos fueron adquiridos por el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Católica con fines académicos y futuras investigaciones en el País.

a. Equipo de pulso ultrasónico:

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL PUNDIT PL-200	
Alcance	0.1 – 7930 μ s
Resolución	0.1 μ s (< 793 μ s), 1 μ s (> 793 μ s)
Pantalla	Pantalla de colores de 7", 800x480 píxeles
Voltaje de pulso	100 Vpp – 450 Vpp
Ganancias del receptor	1x – 10'000x (0 – 80dB)
Sensibilidad del receptor	10 μ V
Memoria	Memoria flash interna de 8 GB
Unidades	Métricas e imperiales
Ancho de banda	54kHz
Tamaño de apertura	Φ 50 mm x 46 mm
Longitud de onda límite	68.5 mm
Tamaño de grano máximo	34 mm (aproximadamente)
Dimensión lateral mínima	69 mm
Aplicaciones	Hormigón, madera, roca.

Tabla 10: Características del equipo de ultrasonido PL-200.

Fuente: PROCEQ S.A.



Figura 35: Equipo de ultrasonido (Ondas P).
Fuente: PROCEQ S.A.

b. Equipo de pulso-eco ultrasónico:

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS PUNDIT PL-200PE	
Alcance	0.1 – 7930 μ s
Resolucion	0.1 μ s (< 793 μ s), 1 μ s (> 793 μ s)
Pantalla	Pantalla de colores de 7", 800x480 píxeles
Voltaje de pulso	100 Vpp – 400 Vpp
Ganancias del receptor	1x – 10'000x (0 – 80dB)
Memoria	Memoria flash interna de 8 GB
Impedancia de entrada del receptor	7k Ω
Unidades	Métricas e imperiales
Anchura de banda	50kHz
Tamaño de apertura	2x25 cm ²
Longitud de onda límite	50 mm (usando una velocidad de pulso de 2500)
Tamaño de grano máximo	50 mm
Dimensión lateral mínima	2 veces el espesor
Profundidad de penetración	Típicamente 500 mm (hasta 1000 mm bajo
Objeto mínimo detectable	Cilindro de aire de 30 mm

Tabla 11: Características del equipo pulso eco PL-200PE.

Fuente: PROCEQ S.A.



Figura 36: Equipo de pulso eco (Ondas S).

Fuente: PROCEQ S.A.

4.3. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS COMPLEMENTARIOS

- Mezcladora de 100 litros de capacidad.
- Prensa Forney para ensayos de compresión simple.
- Cono de Abrams para el análisis de slump.

- Olla de Presión para medir el peso unitario y el contenido de aire.
- Balanzas con precisión de “+/- 0.1 gramos” y “+/- 5 gramos”.
- Termómetro para concreto.
- Moldes cilíndricos de acero, para encofrar probetas de 6x12”.
- Triplay de 3 mm de espesor.
- Nylon de pescar de 0.3 mm de diámetro.
- Equipo para cortar vigas.
- Wincha, carretillas, lampas, martillo de goma, cucharas, regla, baldes, desmoldante, lijas.

CAPÍTULO 5: DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. ETAPA 1: ENSAYOS PRELIMINARES

5.1.1. PLANIFICACIÓN

Los parámetros de control se realizaron según las normas ASTM indicadas en la tabla 12 con el fin de que estos ensayos preliminares sirvan para los diseños de mezcla de la posterior etapa.

Parámetros de Control en estado fresco		
Asentamiento inicial	4” - 6”	ASTM C143
Contenido de aire	1% - 3%	ASTM C138
Temperatura del Concreto	De acuerdo a la T° de ambiente.	ASTM C1064
Parámetros de Control en estado endurecido		
Resistencia a compresión	7 días	ASTM C39

Tabla 12: Parámetros de control.

Para el diseño de mezcla se utilizó una relación agua cemento de 0.7 con un aditivo plastificante POLYHEED 770R, el cual se utiliza 500 ml por cada 100 kg de cemento, como también se utilizó el aditivo NEOPLAST MR500, el cual trabaja como plastificante o superplastificante en 1% del peso del cemento.

En ambos diseños con aditivo se redujo un porcentaje del agua de la mezcla.

5.1.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTROL

La secuencia de mezclado se realizó según la tabla 13.

SECUENCIA DE MEZCLADO	
AGUA (1era carga en peso)	80%
PIEDRA (Peso)	100%
ARENA (Peso)	100%
CEMENTO(Peso)	100%
AGUA (Final en peso)	20%
ADITIVO (En volumen)	100%

Tabla 13: Secuencia de mezclado.

Es importante recalcar que el mezclado duró 5 minutos para cada mezcla.

Se desarrollaron 11 mezclas en total, controladas en el laboratorio. El huso de la piedra es de H67. Ocho de estos resultados fueron realizados con aditivo POLYHEED 770R y 3 con el aditivo NEOPLAST MR500. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 14.

MEZCLA	W/C	ADITIVO	SLUMP (pulg)	CONTENIDO DE AIRE (%)	TEMPERATURA(°C)		RESISTENCIA A 7 DÍAS (kg/cm ²)
					AMBIENTE	CONCRETO	
EP1	0.68	POLYHEED 770R	0.8	3.3	20.0	21.0	252.5
EP2 (*)	0.68	-	2.0	1.6	18.0	19.0	-
EP3	0.68	POLYHEED 770R	3.1	3.9	18.0	19.5	220.5
EP4	0.70	POLYHEED 770R	3.9	2.7	14.0	15.0	163.0
EP5	0.75	POLYHEED 770R	6.5	2.0	18.5	20.0	161.0
EP6	0.80	POLYHEED 770R	6.7	3.5	20.0	22.5	139.8
EP7	0.75	POLYHEED 770R	6.3	4.0	17.0	16.0	137.3
EP8 (*)	0.75	POLYHEED 770R	1.0	3.5	17.0	16.0	-
EP9	0.70	NEOPLAST MR500	2.0	2.0	15.5	16.5	219.4
EP10	0.75	NEOPLAST MR500	4.0	1.9	16.0	16.5	215.5
EP11	0.70	NEOPLAST MR500	6.9	2.0	16.0	16.0	222.3

(*) No se analizó la resistencia a 7 días dado que el resultado de las probetas era muy variable. Tener en cuenta que la mezcla EP2 es sin aditivo.

Tabla 14: Ensayos de control preliminares en concreto.

Siguiendo los parámetros de control de la tabla, se puede deducir lo siguiente:

Asentamiento

Se tuvo variaciones debido al cambio de humedad habitual en la ciudad de Lima, aunque se realizaron correcciones por humedad, el asentamiento variaba según el día de vaciado. Se redujo la cantidad de agua en 5 litros para la mezcla final, así de este modo tener un asentamiento de 5", el cual se encuentre dentro de los parámetros de 4 a 6".

Contenido de aire

Inicialmente se utilizó el aditivo plastificante POLYHEED 770R (hoja técnica anexo 04.01), sin embargo, según los resultados obtenidos en la tabla 14, el contenido de aire era muy variable, desde 2 a 4%. Inicialmente se pensó que estas variaciones

podrían ser causa del cemento o los agregados. Sin embargo, la mezcla EP2, el cuál no utiliza ningún aditivo, mostró que el causante de la variación de aire era el aditivo. Aun añadiendo la mínima cantidad de aditivo de POLYHEED 770R, el contenido del aire era inestable.

Por ende, no hubo mejor solución que escoger el aditivo NEOPLAST MR500. Este aditivo es un superplastificante y según el proveedor, es recomendable utilizar 1% de aditivo según el peso del cemento (véase anexo 04.02). Los ensayos realizados con este aditivo mostraron mejores resultados, ya que el contenido de aire promedio era de 2% (véase tabla 14).

Temperatura

No hubo variación significativa de la temperatura del ambiente. Todos los resultados indicaron estar entre los valores normales para el uso del ultrasonido. Es por ello que no se consideró mayor efecto por temperatura.

Resistencia a la compresión

En cada ensayo realizado en la tabla, se tomó las consideraciones de la ASTM C39 y la NTP 339.034.

A partir de los ensayos preliminares se realizaron mezclas patrón para la fabricación de las vigas y de los muros (véase anexo 06).

5.2. ETAPA 2: FABRICACIÓN DE VIGAS DE CONCRETO

5.2.1. DISTRIBUCIÓN DE LOS VACÍOS

Se realizaron 6 tipos de vigas (véase tabla 15,16 y 17), donde se utilizó esferas de poliestireno expandido como representación de los vacíos. Para contrastar el caso de la longitud de onda, se utilizaron 3 diámetros: 1,4 cm, 2.5 cm y 5 cm con una densidad bruta de 2 kg/m³.

Asimismo, el poliestireno expandido tuvo un recubrimiento de 2 cm y 5 cm de concreto, como también estos se ubicaron en la parte intermedia de las vigas. Además, se colocaron las esferas en una o dos filas, con el fin de registrar el comportamiento del ultrasonido frente a vacíos en diferente profundidad.

Para fabricar las vigas, se utilizaron 18 moldes metálicos de 15.5 cm de alto, 15 cm de ancho y 52 cm de longitud interna. Estos moldes son utilizados para fabricar vigas según la ASTM C42 (véase figura 37).

ESFERAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO CON DIÁMETRO DE 1.4cm		
TIPO	VISTA FRONTAL	VISTA LATERAL
1		
2		
3		

Tabla 15: Vigas con esferas de 1.4cm.

ESFERAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO CON DIÁMETRO DE 2.5cm		
TIPO	VISTA FRONTAL	VISTA LATERAL
4		
5		
6		

Tabla 16: Vigas con esferas de 2.5cm.

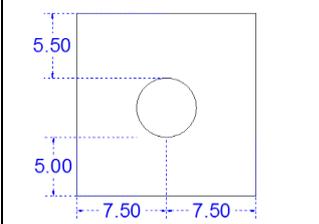
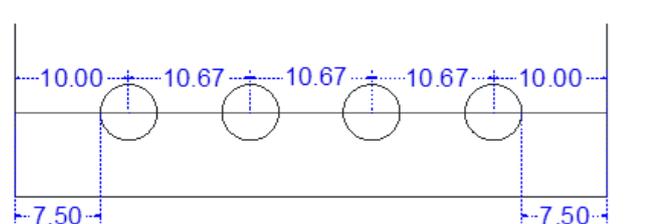
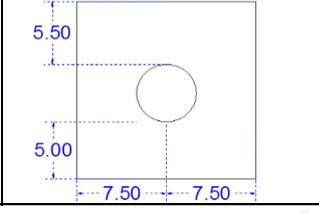
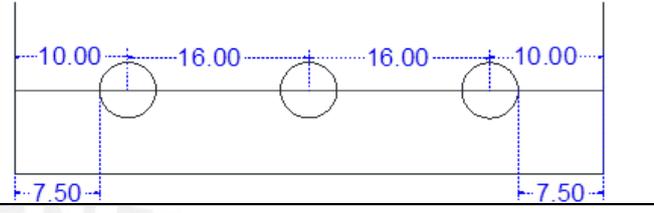
ESFERAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO CON DIÁMETRO DE 5cm		
TIPO	VISTA FRONTAL	VISTA LATERAL
7		
8		

Tabla 17: Vigas con esferas de 5cm.

Además, como un adicional se fabricó vigas con un cubo de poliestireno expandido de 5, 7 o 10cm cada una (véase tabla 18).

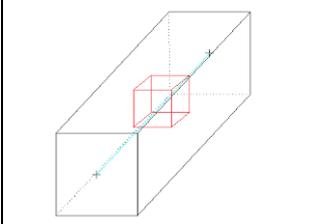
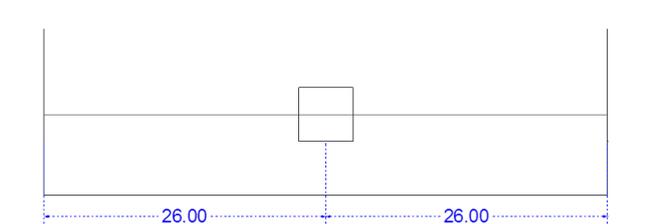
CUBOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO DE 5, 7 y 10cm		
TIPO	VISTA 3D	VISTA LATERAL
9		

Tabla 18: Vigas con cubos de 5,7 o 10cm.



Figura 37: Viga de 15x15.5x55 cm.

5.2.2. ENCOFRADO Y VACIADO DE LAS VIGAS

Se utilizó triplay de 3mm de espesor, con el fin de evitar la perforación de los moldes de acero. Para conseguir que las esferas permanezcan en su posición en el transcurso del vaciado, se realizó pequeños orificios en el triplay con una aguja de 0.5 mm de diámetro, por el cual se atravesó un cable de nylon de 0.3 mm de diámetro. Este cable fue tensado en la dimensión longitudinal por medio de dos tablitas de triplay de 15 x 15 x 0.6 cm (véase figura 38 y 39), los cuales fueron usados como encofrado transversal.

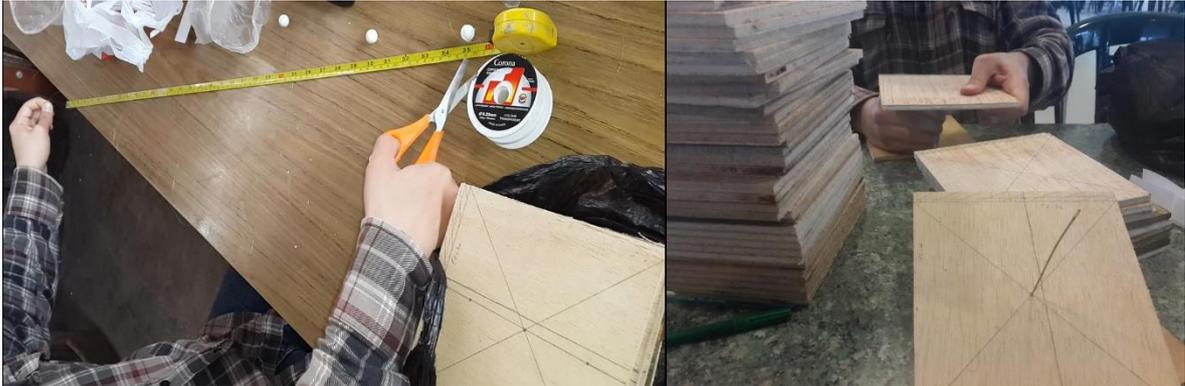


Figura 38 y 39: Fabricación de encofrado de 15 x 15 cm

Para evitar que el poliestireno expandido resbale por el cable, este se sujetó con nudos antes y después del orificio perforado en cada esfera. También, se sujetó cada triplay con el encofrado metálico mediante prensas, para así, mantener el cable lo más tensado posible. Se utilizó petróleo como desmoldante (véase figura 40 y 41).



Figura 40: Vista superior del diseño de la viga.

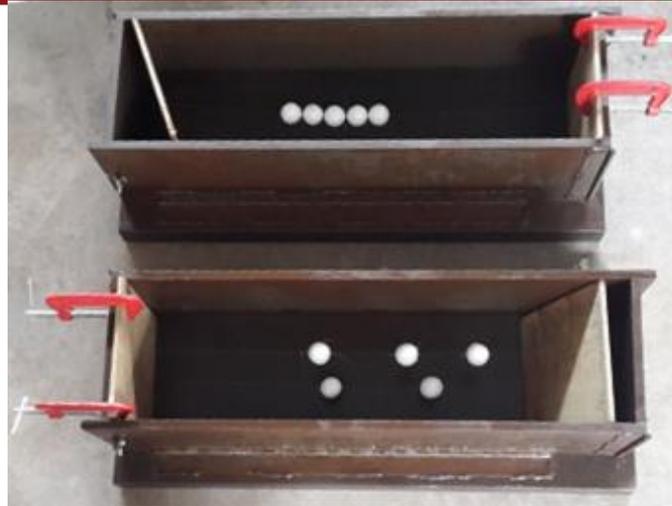


Figura 41: Prensas para tensar el nylon.

Se fabricaron 6 vigas por cada uno de los tipos del 1 al 8, sin embargo, debido a problemas con el revenimiento, el cual se comentará más adelante, se fabricaron vigas adicionales. También, se realizaron nuevos diseños de mezcla patrón para corregir el revenimiento obtenido. Por otro lado, se fabricaron como adicional el tipo 9 tres vigas, de las cuales cada una tenía un cubito de poliestireno expandido de 5, 7 o 10 cm.

Se utilizó una mezcladora de 100 litros de capacidad, con el cual por cada tanda se pudo realizar 4 vigas y 2 probetas de 6 x 12" (véase tabla 19).

FECHA DE FABRICACIÓN	TIPO DE VIGA	HORA	CANTIDAD DE VIGAS FABRICADAS	CAPAS DE CONCRETO FRESCO	COMPACTACIÓN (CANTIDAD)	
					POR VARILLADO	POR MARTILLO DE GOMA
02/09/2014	1	9-12pm	6	2	54	30
	2	1-4pm	6	2	54	30
	3	4-7:30pm	6	2	54	30
04/09/2014	4	9-12pm	6	2	54	30
	5	1-3:30pm	6	2	54	30
	6	3:30-5:30pm	4	2	54	30
05/09/2014	7	9-12pm	6	2	54	30
	8	12-2:30pm	6	2	54	30
	3	2:30-3:30pm	2	2	54	30
	6	3:30-5pm	2	2	54	30
29/10/2014	9	11-12:30pm	3	2	54	30

Tabla 19: Procedimiento en la fabricación de vigas.

Para la compactación se utilizó una varilla de 5/8" de diámetro, el cual estuvo distribuido uniformemente por toda la viga, excepto en la zona central por donde pasaba el cable, ya que existía la posibilidad de romper los cables por el

compactado. Por ello, cuidadosamente se compactó cerca de la zona de las esferas de poliestireno expandido.

Para el compactado lateral se utilizó un martillo de goma. Esta compactación también fue distribuida por toda la viga (véase figura 42).

El compactado se realizó por cada capa: 54 con varilla y 30 con martillo de goma. Cada capa era aproximadamente de 7.5 cm de alto, es decir, la mitad de la altura del molde (Norma de referencia ASTM C31: Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field).

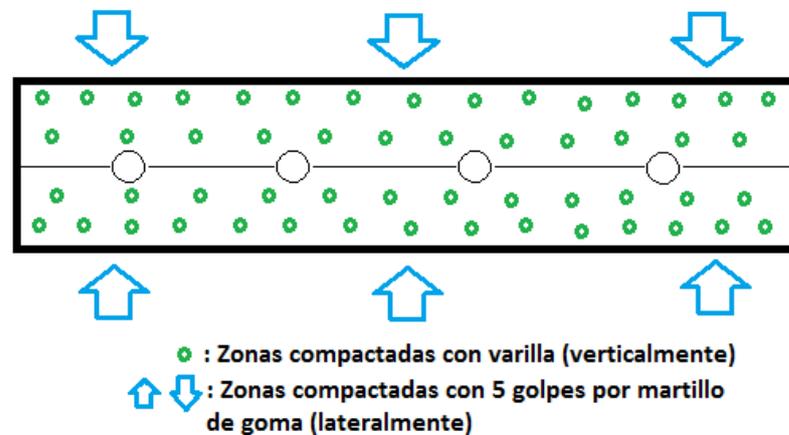


Figura 42: Detalle de la compactación (vista superior de la viga).



Figura 43 y 44: Encofrado y desencofrado de vigas.

5.2.3. PROCEDIMIENTO PARA EL ESCANEO

En el caso del escaneo por medio del equipo de ultrasonido, se realizaron las mediciones en las caras laterales (izquierda y derecha) de cada viga tratando de ubicar las esferas de poliestireno expandido. Se escanearon en general 2 zonas en concreto puro y 4 en zonas donde se encuentran las esferas por cada viga. Tener en cuenta que se tomó en consideración la posibilidad de que estas esferas se hayan desplazado de su posición original (véase figura 45).

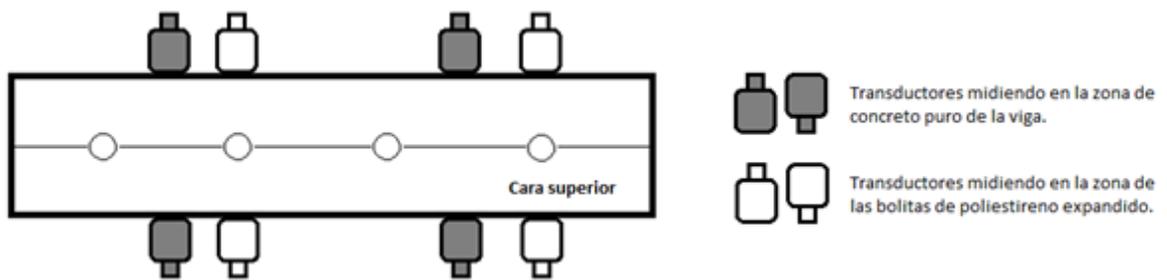


Figura 45: Procedimiento en la medición con ondas P de las vigas.

Se realizaron entre 4 a 6 mediciones en cada punto, hasta que el valor registrado en el equipo se mantenga constante, es decir, hasta que los valores de las velocidades registradas en un mismo punto, repetidas veces, sean similares.

En el caso del escaneo con el equipo de pulso eco, se analizaron las 4 caras longitudinales de las vigas. Para este caso se midió desde el extremo izquierdo hasta el extremo final, con una compensación horizontal de 8cm (mitad de la longitud del equipo), en la parte inicial y final del escaneo de la viga (véase figura 46 y 47).

Se debe tomar en cuenta que las mediciones no deban iniciarse o culminarse muy cerca de las caras laterales de inicio y/o fin de los elementos de concreto, ya que al estar muy cerca los transductores de estas caras, se genera una alta reflexión de las ondas por las caras transversales. Es por esto que se genera distorsión en las mediciones, lo cual se refleja en el incremento de la dimensión de la zona muerta y el campo cercano.

En las vigas se realizaron las mediciones desde el mismo extremo de las caras laterales por limitaciones de espacio, dimensiones de las vigas y para registrar la mayor cantidad de información posible. Es por ello que para tener una mayor cantidad de información, se hizo una toma de datos por cada 0.5 centímetros en cada scan-B.

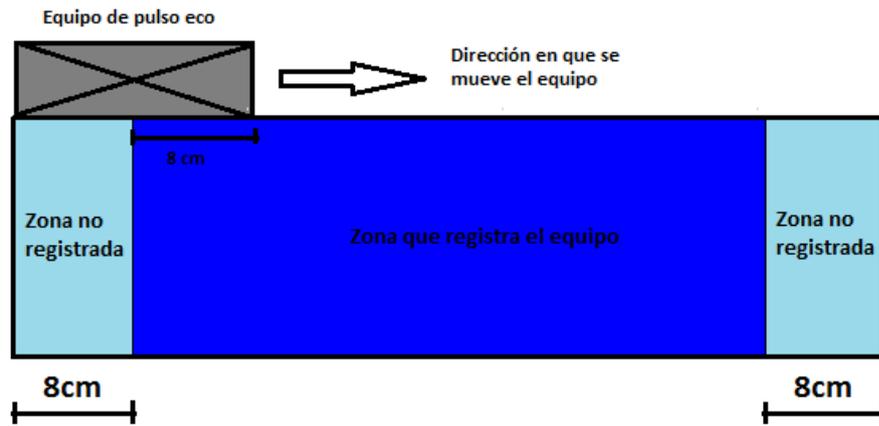


Figura 46: Zonas no registradas por el equipo de ultrasonido.



Figura 47: Escaneo de una viga con el pulso eco.

A cada cara escaneada se le ha denominado como CARA DERECHA, CARA IZQUIERDA, CARA SUPERIOR y CARA INFERIOR (véase figura 48); tomando en cuenta una cara transversal como referencia. Sin embargo, para la cara izquierda se escaneó desde el otro sentido, es decir la cara frontal posterior como referencia (véase figura 48).

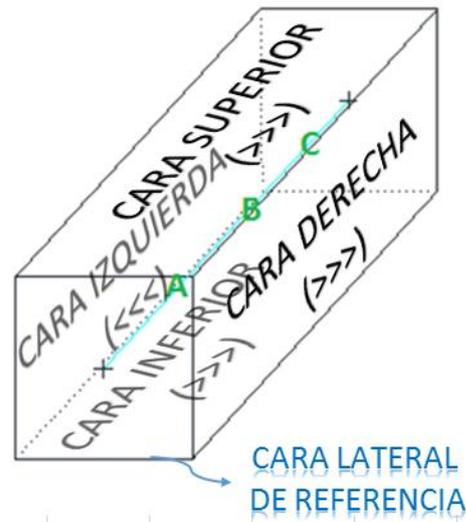


FIGURA 48: Dirección de escaneo en cada cara de viga.



Figura 49: Corte de vigas de concreto.

Por último, debido a que las esferas tienden a desplazarse en el proceso de vaciado. Se decidió cortar las vigas por la sección longitudinal, con el fin de encontrar su ubicación real. Tener en cuenta que sólo se cortaron las vigas en donde se encontraron las esferas (véase figura 49).

5.3. ETAPA 3: FABRICACIÓN DE MUROS DE CONCRETO

5.3.1. DISTRIBUCIÓN DE LOS VACÍOS

Se fabricaron tres tipos de muros de 60 x 60 x 25 cm, dos de cada tipo, en los cuales se colocó una variedad de materiales, con el fin de rastrearlos con los equipos de ultrasonido (véase tabla 20).

Todos estos materiales fueron ubicados en la zona central del ancho de 25 centímetros, ya que debido a la zona muerta y campo cercano, era preferible colocarlos a una profundidad considerable.

El espesor de la botella era de 1.3mm, el envase de cartón de 1.4 mm y la esfera de plástico de 0.6 mm. Por otra parte, el poliestireno expandido utilizado tenía 10kg/m³ de densidad bruta (véase figura 50). Se ubicó el acero a 6 centímetros de la cara inferior, con el fin de que se asemeje a un recubrimiento típico en edificaciones de concreto armado.



Figura 50: Materiales utilizados como vacíos dentro de los muros.

VISTA FRONTAL DE LOS MUROS (DETALLE DE LOS MATERIALES INTERNOS)		
TIPO	CARAS DE LOS MUROS (A,B,C y D)	DIMENSIONES
1	<p>barra de poliestireno (30cm) esferas de plástico botella de plástico</p>	
2	<p>envase de cartón (23cm) cubos de poliestireno barra de poliestireno (15cm)</p>	
3	<p>tubería de PVC 2" tubería de PVC 3" acero de 1"</p>	

Tabla 20: Tipos de muros.

5.3.2. ENCOFRADO Y VACIADO DE LOS MUROS

Para el encofrado se utilizó paneles de madera, el cual fue reforzado con alambres y clavos para que no haya problemas en el momento del vaciado. Al igual que las vigas, en este caso se utilizó cables de nylon de 0.3 mm, los cuales fueron tensados en el ancho de 25 mm del encofrado; esto permitía que la deflexión sea menor comparada a la de las vigas (52 cm). Para lograr el tensado, se hicieron agujeros en el encofrado de madera por medio de clavos de 2 mm de diámetro. Además, se utilizaron nudos antes y después de cada material, con el fin de que estos materiales no resbalen por el cable (Véase figura 51,52 y 53).



Figura 51: Encofrado del muro tipo 1.



Figura 52 y 53: Encofrado del muro tipo 2 y 3.

En este caso se vació el concreto en 3 capas, con una compactación siguiendo la norma ASTM C192: Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.

Al igual que las vigas, se utilizó la mezcladora de 100 litros de capacidad, con el cuál se obtuvo 1 muro y 2 probetas de 6 x 12” por cada vaciado. La compactación fue con una varilla de 5/8” y con un martillo de goma, y de igual manera, distribuidas uniformemente en el molde. Las primeras dos capas tenían una altura tal que éstas cubrían completamente a los 2 primeros niveles de los materiales introducidos. Sin embargo, la última capa fue completada al ras del encofrado. (Véase tabla 21).

FECHA DE FABRICACIÓN	TIPO DE MURO	HORA	CANTIDAD DE MUROS FABRICADOS	CAPAS DE CONCRETO FRESCO	COMPACTACIÓN (CANTIDAD)	
					POR VARILLADO	POR MARTILLO DE GOMA
03/11/2014	1	2-4pm	2	3	90	50
	2	4-5pm	1	3	90	50
05/11/2014	2	1-3pm	1	3	90	50
	3	3-4pm	2	3	90	50

Tabla 21: Procedimiento en la fabricación de muros.

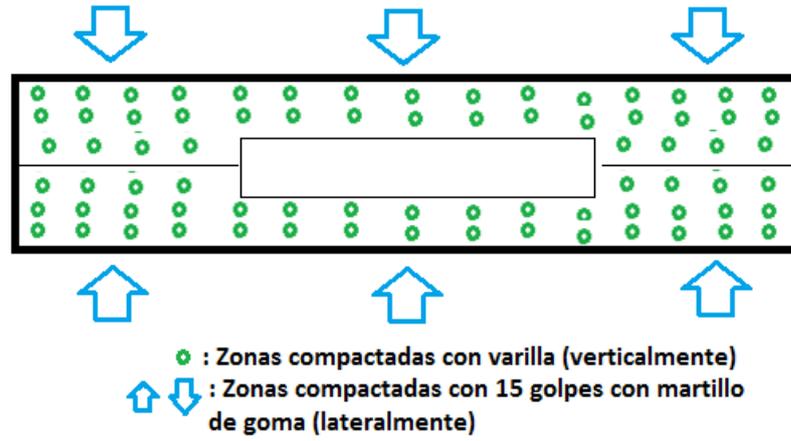


Figura 54: Detalle de la compactación (vista superior del muro)



Figura 55: Compactación muro tipo 1.



Figura 56 y 57: Desencofrado de los muros.

5.3.3. PROCEDIMIENTO PARA EL ESCANEEO

Para el caso del escaneo por ultrasonido, se midieron las zonas donde se ubicaban los objetos introducidos, como también zonas donde se conoce que existía concreto puro. Esto con el fin de comparar los resultados obtenidos y su variación (véase figura 58). Las zonas se analizaron hasta que la onda se estabilice, es decir, entre 5 a 6 mediciones.

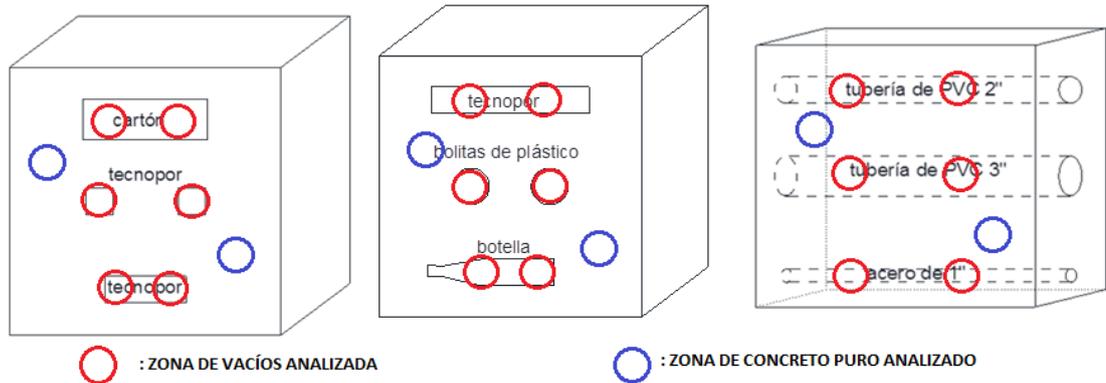


Figura 58: Zonas analizadas con el equipo de ultrasonido.

Tener en cuenta que para el caso de las zonas de concreto puro analizados, se tomó el promedio de cuatro valores de diferentes zonas, con el fin de tener un valor confiable.

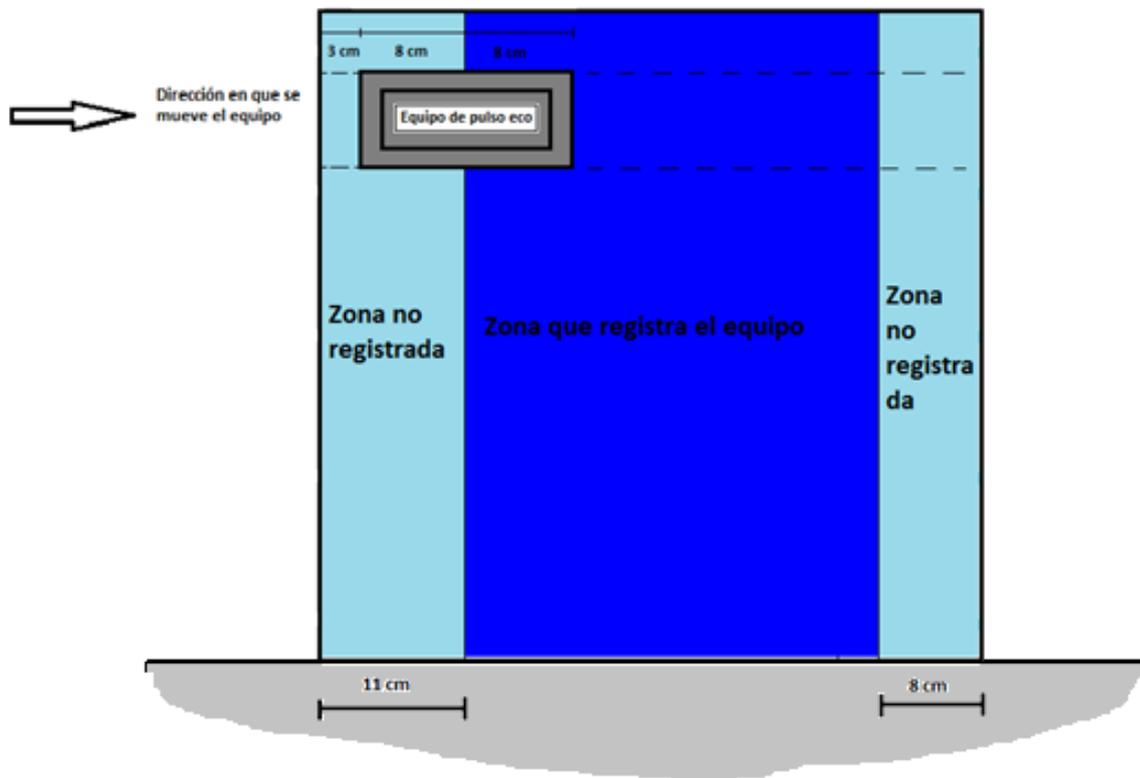


Figura 59: Zonas no escaneadas por el equipo de ultrasonido.

Por otro lado, para el análisis por medio del equipo de pulso eco, se decidió empezar a medir no desde el borde inicial, sino a 3 cm alejado del borde, por lo que el equipo comenzó a analizar desde los 11 cm (3 cm alejado del borde y 8 cm de compensación por la mitad de la longitud del equipo). Se realizó de este modo, con el fin de evitar el efecto de rebotes de la señal en las caras laterales, los cuales alteran las mediciones iniciales. Sin embargo, como compensación en el extremo final, solo se tomó en cuenta los 8 cm no registrados por el equipo. Por último la toma de datos se realizó por cada 0.5 centímetros, con el fin de incrementar la precisión del equipo (véase figura 59).

Se denominó cada cara de 50 x 50 cm en A y B, los cuales se han dividido en 4 franjas horizontales (DERECHA 1, 2, 3, 4) y 4 verticales (ARRIBA/ABAJO 1, 2, 3, 4); y las laterales de 25 x 50cm como C y D, los cuales son solo de una franja (ARRIBA/ABAJO 1). No se ha escaneado las caras superior e inferior, ya que en el camino de la onda se encontraban hasta con 3 materiales diferentes (véase figura 60 y 61).

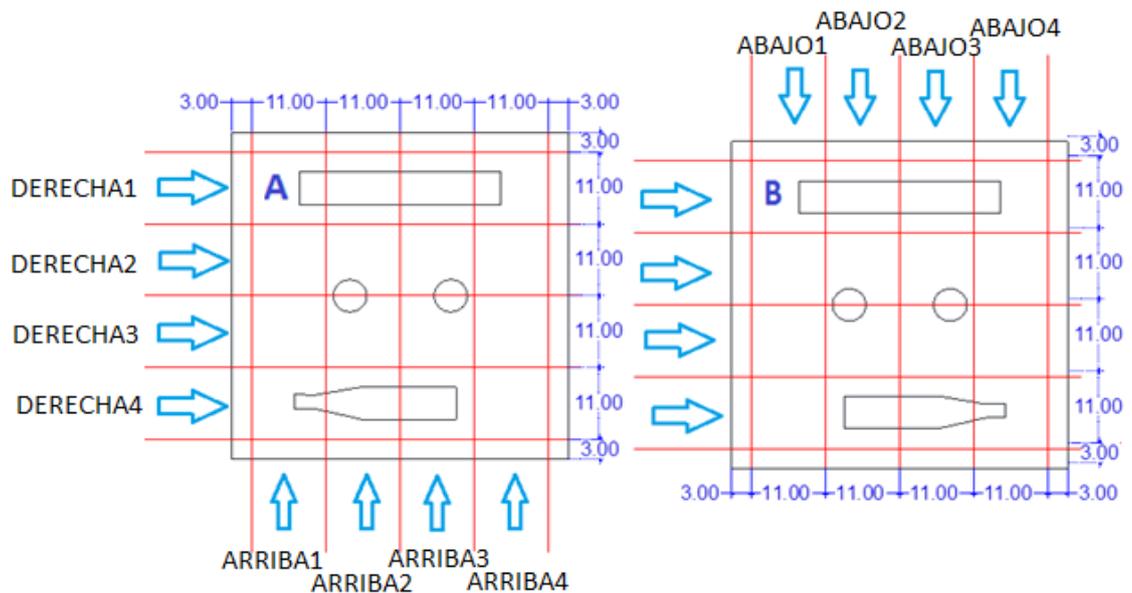


Figura 60: Franjas escaneadas - Cara "A" y "B".

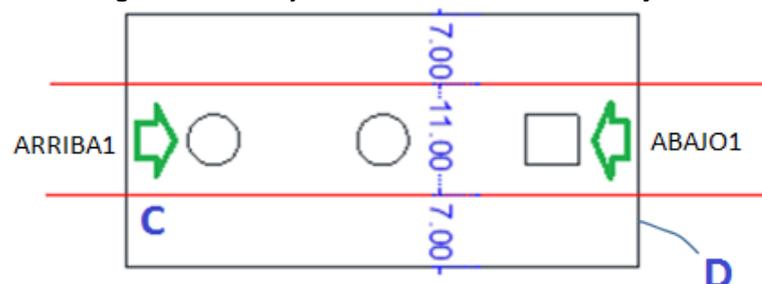


Figura 61: Franjas escaneadas - Cara "C" y "D" (muro rotado 90 grados).

CAPÍTULO 6: RESULTADOS OBTENIDOS

6.1. VIGAS DE CONCRETO

6.1.1. ENSAYOS EN CONCRETO FRESCO Y ENDURECIDO

En la tabla 22 se muestra los resultados obtenidos en los ensayos de control.

Día de vaciado	Hora de fabricación	Código de mezcla	Fabricación	Slump (pulg)	Contenido de aire (%)	Rendimiento	Días del concreto	Resistencia (kg/cm ²)
02/09/2014	9am	V1	4 vigas y 2 probetas	5.9	1.3	1.03	56	289.02
	11am	V2	4 vigas y 2 probetas	5.9	1.4	1.02	56	294.87
	1pm	V3	4 vigas y 1 probeta	6.0	2.3	1.00	56	284.09
	3pm	V4	4 vigas y 2 probetas	5.5	1.7	1.03	56	293.31
	5pm	V5	2 vigas y 1 probetas	2.8	1.8	1.02	56	266.73
04/09/2014	9am	V6	4 vigas y 2 probetas	6.0	1.5	1.01	56	258.22
	11am	V7	4 vigas y 2 probetas	4.0	1.9	1.01	56	262.78
	2pm	V8	4 vigas y 2 probetas	4.3	1.9	1.01	56	267.85
	4pm	V9	4 vigas y 2 probetas	4.1	2.2	1.01	56	258.68
05/09/2014	9am	V10	4 vigas y 2 probetas	4.2	1.8	1.02	56	267.62
	11am	V11	4 vigas y 2 probetas	4.0	1.8	1.01	56	259.71
	2pm	V12	4 vigas y 2 probetas	4.1	1.9	1.02	56	287.94
	4pm	V13	4 vigas y 2 probetas	4.0	1.9	1.02	56	281.68
29/10/2014	9am	V14	3 vigas y 1 probetas	7.9	1.7	1.01	28	268.44
		Total	53 vigas y 25 probetas					

(*) En la mezcla V5 y V14 sólo se obtuvo 1 probeta, por lo que no se tomará como resultado fiable la resistencia en compresión.

Tabla 22: Ensayos de control en vigas de concreto.

El revenimiento o slump en las mezcla V5 se encuentra fuera de los parámetros de control, por lo que no será tomado en consideración al ser analizado con el equipo de ultrasonido. Tener en cuenta que la mezcla V14 es un adicional, por lo que sólo se tomará de referencia en los escaneos con ondas ultrasónicas.

6.1.2. ESCANEO CON ULTRASONIDO (ONDAS P)

Por cada viga se analizó la velocidad de onda P en las zonas de esferas de poliestireno expandido, como también en las zonas de concreto puro. Luego, se analizó la variación, en porcentaje, que tiene la velocidad atravesando una esfera, respecto a la velocidad de onda P atravesando concreto puro.

Como se conoce el espesor de las vigas, se puede hallar la velocidad con el tiempo que demora la onda en atravesar una viga. En la tabla 23, se aprecia la velocidad que demora la onda por cada viga (zona de esferas y de concreto puro).

TAMAÑO DE VACÍOS (cm)	CÓDIGO DE VIGA	VELOCIDAD DE ULTRASONIDO (m/s)	VELOCIDAD DE ULTRASONIDO (m/s)			VARIACIÓN(%)	
			CONCRETO PURO	ESFERA CENTRAL	ESFERA LATERAL	ESFERA CENTRAL	ESFERA LATERAL
1.4	V1-1L-1	4096	4076	4054	4054	-0.54	-0.54
	V1-1L-2		4144	4110	4110	-0.82	-0.82
	V1-1L-3		4054	3989	4043	-1.60	-0.27
	V1-1L-4		4110	4120	4121	0.24	0.27
	V2-1L-1	4116	4043	4054	3968	0.27	-1.86
	V2-1L-2		4104	4087	4087	-0.41	-0.41
	V2-2L(5)-3		4138	4132	4178	-0.14	0.97
	V2-2L(5)-4		4178	4178	4138	0.00	-0.96
	V3-2L(5)-1	3922	3937	3968	3876	0.79	-1.55
	V3-2L(5)-2		3896	3916	3886	0.51	-0.26
	V3-2L(5)-3		3916	3927	3937	0.28	0.54
	V3-2L(5)-4		3937	3937	3937	0.00	0.00
	V4-2L(2)-1	4120	4178	4180	4190	0.05	0.29
	V4-2L(2)-2		4121	4076	4098	-1.09	-0.56
	V4-2L(2)-3		4116	4132	4155	0.40	0.96
	V4-2L(2)-4		4065	4054	4121	-0.27	1.38
V13-2L(2)-1	4099	4121	4098	4098	-0.56	-0.56	
V13-2L(2)-2		4077	4065	4076	-0.28	-0.01	
2.5	V6-2L(2)-1	3969	3974	3916	3926	-1.45	-1.20
	V6-2L(2)-2		3979	4012	4032	0.83	1.33
	V6-2L(2)-3		4011	4021	4021	0.25	0.25
	V6-2L(2)-4		3911	3947	3916	0.92	0.13
	V7-2L(2)-1	3982	3932	3958	3947	0.66	0.38
	V7-2L(2)-2		4022	4011	3989	-0.26	-0.81
	V7-2L(5)-3		3979	3947	3937	-0.80	-1.06
	V7-2L(5)-4		3995	4021	3989	0.66	-0.14
	V8-2L(5)-1	4061	4104	4032	3989	-1.75	-2.80
	V8-2L(5)-2		4066	4076	4054	0.26	-0.28
	V8-2L(5)-3		4021	3979	3948	-1.04	-1.82
	V8-2L(5)-4		4052	4032	4076	-0.49	0.59
	V9-1L-1	3991	3958	3937	3937	-0.53	-0.53
	V9-1L-2		3979	3979	3989	0.01	0.26
	V9-1L-3		4021	3937	3927	-2.09	-2.34
	V9-1L-4		4005	3989	3984	-0.40	-0.52
V13-1L-3	4019	4011	4043	4054	0.80	1.07	
V13-1L-4		4027	4011	3989	-0.40	-0.94	
5	V10-4BO-1	4131	4077	3877	3938	-4.91	-3.41
	V10-4BO-2		4179	3940	3990	-5.72	-4.52
	V10-4BO-3		4133	3857	3969	-6.68	-3.97
	V10-4BO-4		4133	3938	4011	-4.72	-2.95
	V11-4BO-1	4109	4179	3857	3958	-7.71	-5.29
	V11-4BO-2		4033	3979	3979	-1.34	-1.34
	V11-3BO-3		4179	3990	3979	-4.52	-4.79
	V11-3BO-4		4044	3952	3963	-2.27	-2.00
	V12-3BO-1	4058	4055	3817	3817	-5.87	-5.87
	V12-3BO-2		4088	3990	3948	-2.40	-3.42
	V12-3BO-3		4044	3990	3948	-1.34	-2.37
	V12-3BO-4		4044	3887	3897	-3.88	-3.64
5	V14-5cm	4117	4142	3836		-7.38	
7	V14-7cm		4099	2530		-38.28	
10	V14-10cm		4110	3456		-15.91	

Variación mayor al 2% del concreto puro.

Variación menor al 2% del concreto puro.

Tabla 23: Resultados de la velocidad onda P en vigas.

Se aprecia en la tabla 23, que en la zona de poliestireno expandido la velocidad disminuyó debido a que la onda se demora más en llegar del transductor emisor al receptor. En la norma ASTM C597, indica que la velocidad de un escaneo no debe variar en más del 2% para un operador, por ende en la tabla 23, se ha considerado como vacío si la velocidad se reduce en más del 2% a la velocidad de concreto puro por cada viga.

El vaciado V14, es un adicional, por lo que solo se ha considerado en la tabla 23 para mostrar la variación de la velocidad debido al tamaño de estos cubos. En la tabla 24, se muestra la velocidad promedio, desviación estándar y el coeficiente de variación de la tabla 23. Tener en cuenta que en la tabla 24 no se ha considerado los resultados de la mezcla V14.

VIGAS		
VELOCIDAD PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	COEF. DE VARIACIÓN
4051 m/s	78 m/s	1.91%

Tabla 24: Resultados de la velocidad onda P en vigas (resumen).

Se aprecia en la tabla 24 que el coeficiente de variación no sobrepasa el 2%, por lo que la elección de considerar como vacío una variación mayor al 2% del concreto puro, es aceptable.

6.1.3. ESCANEADO CON PULSO ECO (ONDAS S)

Para cada cara escaneada se ha analizado:

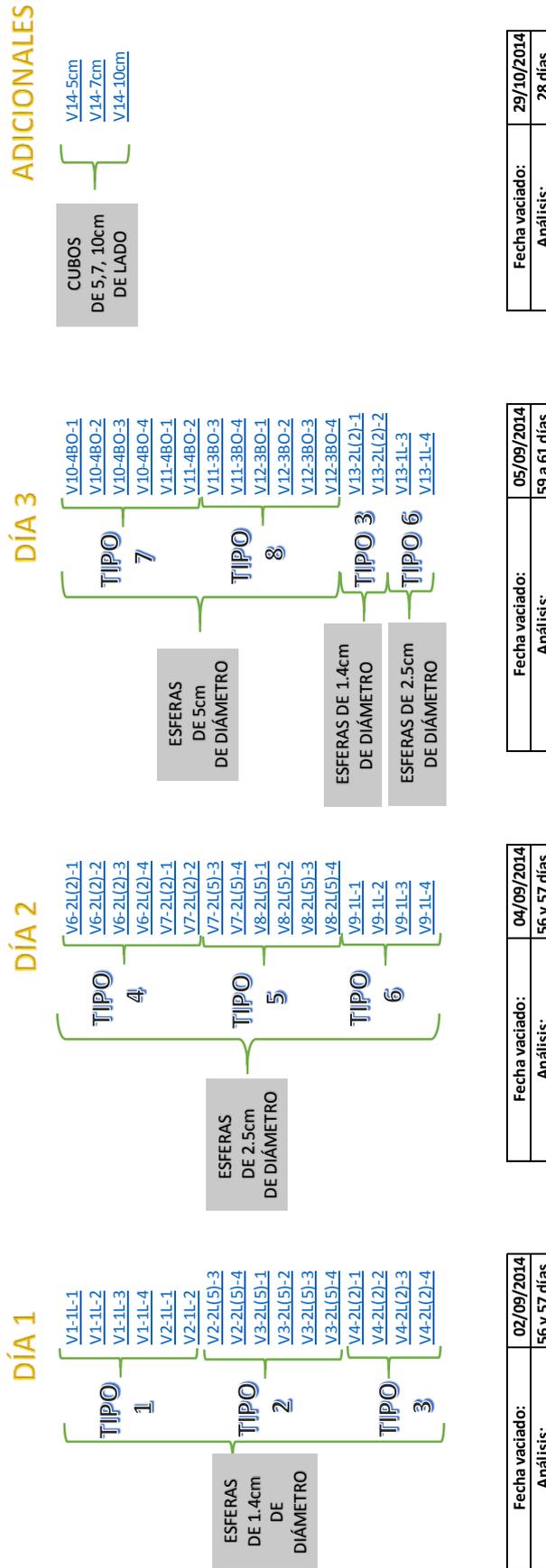
- Profundidad de la zona muerta y campo cercano.
- velocidad de la onda S.
- Espesor de las vigas (escaneado y real)
- Ubicación de los vacíos (horizontal y profundidad).

Además un posible diámetro que estos materiales puedan tener dependiendo de la experiencia del operador. Estos diámetros no son fiables, ya que depende de la ganancia de colores que el operador utilice, según su criterio, en cada medición.

A continuación se muestra en la figura 62, un resumen completo de las vigas fabricadas.



RESUMEN DE VIGAS



(*) Se utilizaron en todos los casos, como vacíos dentro de las vigas de concreto, poliestireno expandido en forma de esferas o cubos.

Figura 62: Resumen de vigas.

a. PROFUNDIDAD DE LA ZONA MUERTA Y CAMPO CERCANO

VIGA	ZONA MUERTA (cm)				ZONA MUERTA MÁS CAMPO CERCANO (cm)			
	DERECHA	IZQUIERDA	SUPERIOR	INFERIOR	DERECHA	IZQUIERDA	SUPERIOR	INFERIOR
V1-1L-1	1.9	1.9	1.9	1.8	3.9	4.0	3.9	3.7
V1-1L-2	1.9	2.0	1.8	2.0	3.9	4.0	3.7	3.8
V1-1L-3	1.8	1.8	1.9	1.8	3.7	3.7	3.9	4.3
V1-1L-4	1.9	1.8	1.8	1.9	4.0	3.8	3.7	3.9
V2-1L-1	1.8	1.9	1.9	1.8	3.8	3.9	3.8	3.7
V2-1L-2	1.9	1.8	1.8	1.7	3.8	3.8	3.6	3.7
V2-2L(5)-3	2.0	2.0	1.9	1.9	4.1	4.1	3.8	4.0
V2-2L(5)-4	1.9	1.9	1.9	1.9	4.1	3.9	3.9	4.0
V3-2L(5)-1	1.8	1.8	1.6	1.7	3.8	3.7	3.4	3.5
V3-2L(5)-2	1.8	1.9	1.8	1.7	4.1	4.0	3.9	3.7
V3-2L(5)-3	1.8	1.8	1.8	1.8	4.2	3.6	3.7	3.6
V3-2L(5)-4	1.9	1.8	1.9	1.9	4.0	3.6	3.8	3.9
V4-2L(2)-1	1.7	1.8	1.7	1.9	3.8	3.6	3.6	3.9
V4-2L(2)-2	1.9	2.0	1.9	1.9	4.0	4.1	3.8	3.9
V4-2L(2)-3	2.0	1.9	1.9	1.9	3.9	4.0	4.1	3.8
V4-2L(2)-4	1.9	1.9	1.7	1.9	3.9	3.9	3.6	3.9
V6-2L(2)-1	1.8	1.8	1.6	1.9	3.6	3.7	4.3	3.8
V6-2L(2)-2	1.8	1.8	1.9	1.8	3.6	3.8	3.8	3.8
V6-2L(2)-3	1.8	1.7	1.9	1.7	3.5	3.6	3.9	3.5
V6-2L(2)-4	1.8	1.8	1.7	1.8	4.0	3.9	3.7	3.8
V7-2L(2)-1	1.7	1.5	1.6	1.5	4.0	3.0	3.5	3.6
V7-2L(2)-2	1.7	1.7	1.5	1.6	3.7	3.8	3.5	3.6
V7-2L(5)-3	1.8	1.7	1.6	1.5	4.1	4.3	3.1	3.2
V7-2L(5)-4	1.8	1.7	1.7	1.9	3.7	3.6	3.8	3.8
V8-2L(5)-1	1.8	1.9	1.7	1.7	4.0	4.2	3.4	3.8
V8-2L(5)-2	1.9	1.7	1.7	1.9	4.0	4.0	3.8	3.8
V8-2L(5)-3	1.8	1.8	1.6	1.7	3.7	3.7	3.3	4.0
V8-2L(5)-4	1.9	1.8	1.8	1.6	3.9	3.7	3.9	3.4
V9-1L-1	1.9	1.9	1.6	1.8	3.9	3.8	3.5	3.8
V9-1L-2	1.8	1.9	1.8	1.9	3.8	3.8	3.8	3.9
V9-1L-3	1.8	1.8	1.6	1.8	4.0	4.0	3.3	3.7
V9-1L-4	1.9	1.9	1.8	1.9	4.0	4.3	3.7	3.7
V10-4BO-1	1.9	1.8	1.7	1.8	3.9	3.7	3.5	3.8
V10-4BO-2	1.7	1.8	1.8	1.6	4.3	3.8	3.6	3.6
V10-4BO-3	1.8	1.9	1.9	1.8	3.8	4.0	3.8	3.6
V10-4BO-4	1.8	1.7	1.8	1.8	4.0	3.6	4.0	3.8
V11-4BO-1	1.8	1.8	1.8	1.7	3.7	3.9	3.7	3.6
V11-4BO-2	1.7	1.7	1.8	1.8	3.7	4.0	3.6	4.0
V11-3BO-3	1.8	1.7	1.8	1.6	3.7	3.7	3.7	3.4
V11-3BO-4	1.7	1.8	1.7	1.9	3.7	3.9	3.7	3.9
V12-3BO-1	1.8	1.8	1.8	1.8	3.8	3.8	3.7	3.9
V12-3BO-2	1.8	1.8	1.7	1.8	3.7	3.9	3.7	3.8
V12-3BO-3	1.8	1.7	1.5	1.9	4.0	3.7	3.2	3.9
V12-3BO-4	1.8	1.9	1.8	1.9	4.0	3.9	3.7	3.9
V13-2L(2)-1	1.9	1.7	1.8	1.7	3.9	3.6	3.7	3.9
V13-2L(2)-2	1.8	1.9	1.8	1.6	4.2	3.9	3.8	3.5
V13-1L-3	1.8	1.9	1.7	1.9	3.8	4.0	3.6	3.9
V13-1L-4	1.9	1.9	1.8	1.7	3.8	4.0	3.8	3.5
	PROMEDIO (cm)			1.80	PROMEDIO (cm)			3.79
	DESV. ESTANDAR (cm)			0.10	DESV. ESTANDAR (cm)			0.21
	COEF. VARIACIÓN (%)			5.81	COEF. VARIACIÓN (%)			5.65

	Concreto con presencia de zona muerta y campo cercano.	192 datos	78.37
	Concreto sin presencia de zona muerta y campo cercano.	53 datos	21.63

Tabla 25: Zona muerta y campo cercano - vigas.

Se analizó el espesor de la zona muerta y campo cercano, según lo especificado en el punto “F” del capítulo 3.4.3. Primero se analizó el espesor de la zona muerta, para luego, el tamaño de la zona muerta con el campo cercano, es decir, hasta que la señal se estabiliza.

Según la tabla 25, se aprecia que la zona muerta tiene un espesor promedio de 1.80 centímetros, y el campo cercano más zona muerta de 3.79 centímetros. Además, estas zonas aparecen en el 78.37% de las franjas escaneadas. En resumen, no hay posibilidad de encontrar imperfecciones en los primeros 1.80 centímetros de profundidad. Por otra parte, encontrar esferas entre 1.80 a 3.79 centímetros es de 21.63%. Por lo tanto se deduce que este equipo es recomendable para encontrar vacíos a profundidades de más de 3.79 cm.

b. VELOCIDAD DE ONDA

Se analizó la velocidad de la onda S en las cuatro caras longitudinales de cada viga. Debido a que estas son de la misma dosificación, se halló el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación (véase tabla 26).

Según la tabla 26, el coeficiente de variación es de 2.08% del promedio de todas las velocidades, casi similar al 1.91% encontrado en las velocidades de las ondas P.

VIGA	VELOCIDAD ONDA S (m/s)				PROMEDIO
	DERECHA	IZQUIERDA	SUPERIOR	INFERIOR	
V1-1L-1	2263	2263	2263	2304	2265
V1-1L-2	2253	2331	2237	2331	
V1-1L-3	2234	2244	2234	2212	
V1-1L-4	2283	2263	2224	2304	
V2-1L-1	2264	2263	2304	2329	2303
V2-1L-2	2271	2331	2283	2287	
V2-2L(5)-3	2304	2304	2304	2334	
V2-2L(5)-4	2295	2304	2329	2345	
V3-2L(5)-1	2165	2187	2125	2217	2198
V3-2L(5)-2	2183	2195	2183	2213	
V3-2L(5)-3	2184	2150	2174	2232	
V3-2L(5)-4	2231	2231	2272	2224	
V4-2L(2)-1	2249	2310	2224	2241	2264
V4-2L(2)-2	2310	2309	2174	2304	
V4-2L(2)-3	2263	2257	2241	2311	
V4-2L(2)-4	2252	2248	2230	2297	
V6-2L(2)-1	2231	2177	2166	2263	2207
V6-2L(2)-2	2179	2168	2205	2199	
V6-2L(2)-3	2186	2224	2232	2224	
V6-2L(2)-4	2209	2224	2193	2232	
V7-2L(2)-1	2141	2168	2205	2177	2194
V7-2L(2)-2	2186	2215	2177	2253	
V7-2L(5)-3	2196	2150	2168	2186	
V7-2L(5)-4	2232	2215	2193	2244	
V8-2L(5)-1	2196	2206	2144	2234	2203
V8-2L(5)-2	2187	2153	2141	2264	
V8-2L(5)-3	2224	2187	2144	2193	
V8-2L(5)-4	2240	2230	2215	2295	
V9-1L-1	2224	2194	2182	2271	2209
V9-1L-2	2187	2224	2195	2253	
V9-1L-3	2172	2181	2158	2234	
V9-1L-4	2187	2219	2224	2234	
V10-4BO-1	2257	2295	2205	2295	2256
V10-4BO-2	2230	2217	2224	2263	
V10-4BO-3	2255	2232	2280	2255	
V10-4BO-4	2255	2224	2329	2272	
V11-4BO-1	2186	2224	2187	2272	2210
V11-4BO-2	2210	2205	2195	2215	
V11-3BO-3	2168	2150	2215	2253	
V11-3BO-4	2218	2205	2209	2240	
V12-3BO-1	2202	2234	2196	2263	2241
V12-3BO-2	2287	2256	2225	2279	
V12-3BO-3	2224	2228	2224	2244	
V12-3BO-4	2234	2263	2237	2256	
V13-2L(2)-1	2227	2172	2224	2279	2236
V13-2L(2)-2	2224	2240	2177	2283	
V13-1L-3	2205	2244	2224	2275	
V13-1L-4	2244	2279	2273	2210	
PROMEDIO (m/s)					2232
DESV. EST. (m/s)					46
COEF. VARI. (%)					2.08

Tabla 26 : Velocidad de la onda S en las vigas.

c. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR

Para el caso de las vigas, se escaneo la dimensión de la profundidad de rebote, es decir, el espesor de cada viga. Debido a que todas las vigas son de la misma relación agua cemento ($w/c = 0.7$) y aproximadamente del mismo ancho, se halló la variación en porcentaje del espesor escaneado con el espesor real. Al final se obtuvo el rango de valores de dispersión (véase tabla 27).

Según la tabla 27, el error máximo del ancho en una viga con ancho nominal de 15 centímetros, está en el rango de -12.99% a 7.89%. Es decir, la máxima dispersión encontrada al escanear espesores en el caso de las vigas, es de 12.99%.



VIGA	ESPESOR REAL (cm)				ESPESOR ESCANEADO (cm)				% DE ERROR SEGÚN ESPESOR REAL				
	DERECHA	IZQUIERDA	SUPERIOR	INFERIOR	DERECHA	IZQUIERDA	SUPERIOR	INFERIOR	DERECHA	IZQUIERDA	SUPERIOR	INFERIOR	
V1-1L-1	15.2	15.4	15.5	15.5	15.7	15.7	16	16.2	-3.29	-1.95	-3.23	-4.52	
V1-1L-2	15.1	15.1	15.5	15.5	15.6	16.2	15.8	16.5	-3.31	-7.28	-1.94	-6.45	
V1-1L-3	15.2	15.2	15.5	15.5	15.7	15.8	15.9	15.2	-3.29	-3.95	-2.58	1.94	
V1-1L-4	15	15	15.5	15.5	15.8	15.8	15.7	16.3	-5.33	-5.33	-1.29	-5.16	
V2-1L-1	15.1	15.1	15.5	15.5	15.7	15.7	16.3	16.3	-3.97	-3.97	-5.16	-5.16	
V2-1L-2	15.2	15.2	15.5	15.5	15.6	15.7	16.1	16	-2.63	-3.29	-3.87	-3.23	
V2-2L(5)-3	15.1	15.1	15.4	15.4	16.1	15.9	16.4	16.4	-6.62	-5.30	-6.49	-6.49	
V2-2L(5)-4	15.2	15.2	15.5	15.5	15.8	15.6	16.1	16.3	-3.95	-2.63	-3.87	-5.16	
V3-2L(5)-1	15.3	15.3	15.4	15.4	15.8	16.1	15.2	16.6	-3.27	-5.23	1.30	-7.79	
V3-2L(5)-2	15.1	15.1	15.4	15.4	15.9	15.9	16.3	16.3	-5.30	-5.30	-5.84	-5.84	
V3-2L(5)-3	15.2	15.2	15.4	15.4	15.8	15.6	16.1	16.4	-3.95	-2.63	-4.55	-6.49	
V3-2L(5)-4	15.2	15.2	15.4	15.4	16.3	16	16.7	16.4	-7.24	-5.26	-8.44	-6.49	
V4-2L(2)-1	15.2	15.2	15.4	15.4	15.6	15.9	15.3	16	-2.63	-4.61	0.65	-3.90	
V4-2L(2)-2	15.1	15.1	15.5	15.5	15.8	16	15.8	16.3	-4.64	-5.96	-1.94	-5.16	
V4-2L(2)-3	15.1	15.1	15.3	15.3	15.9	15.8	15.9	16.6	-5.30	-4.64	-3.92	-8.50	
V4-2L(2)-4	15.2	15.2	15.5	15.5	16	15.6	15.7	16.4	-5.26	-2.63	-1.29	-5.81	
V6-2L(2)-1	15.2	15.2	15.5	15.5	15.7	15.7	15.2	16.4	-3.29	-3.29	1.94	-5.81	
V6-2L(2)-2	15.3	15.3	15.4	15.4	15.7	15.4	16.4	17.4	-2.61	-0.65	-6.49	-12.99	
V6-2L(2)-3	15.2	15.2	15.5	15.5	16	16.2	16.4	16.4	-5.26	-6.58	-5.81	-5.81	
V6-2L(2)-4	15.3	15.3	15.3	15.3	15.7	15.8	15.7	16	-2.61	-3.27	-2.61	-4.58	
V7-2L(2)-1	15.2	15.2	15.4	15.4	15.9	15.2	16.3	16.6	-4.61	0.00	-5.84	-7.79	
V7-2L(2)-2	15.2	15.2	15.4	15.4	15.6	15.6	16	15.7	-2.63	-2.63	-3.90	-1.95	
V7-2L(5)-3	15.2	15.2	15.3	15.3	15.9	15.4	15.9	15.9	-4.61	-1.32	-3.92	-3.92	
V7-2L(5)-4	15.2	15.2	15.5	15.5	16	15.7	16	16.4	-5.26	-3.29	-3.23	-5.81	
V8-2L(5)-1	15.2	15.2	15.4	15.4	15.8	15.8	15.7	16.4	-3.95	-3.95	-1.95	-6.49	
V8-2L(5)-2	15.2	15.2	15.3	15.3	15.8	15.4	15.9	16.6	-3.95	-1.32	-3.92	-8.50	
V8-2L(5)-3	15.2	15.2	15.5	15.5	15.8	15.5	15.8	16.3	-3.95	-1.97	-1.94	-5.16	
V8-2L(5)-4	15	15	15.5	15.5	15.8	15.8	15.9	16.7	-5.33	-5.33	-2.58	-7.74	
V9-1L-1	15.3	15.3	15.4	15.4	15.8	15.5	15.5	16.4	-3.27	-1.31	-0.65	-6.49	
V9-1L-2	15.2	15.2	15.5	15.5	15.8	15.9	16	15.4	-3.95	-4.61	-3.23	0.65	
V9-1L-3	15.3	15.3	15.4	15.4	15.8	15.5	15.3	15	-3.27	-1.31	0.65	2.60	
V9-1L-4	15.2	15.2	15.3	15.3	15.8	16	15.6	15.9	-3.95	-5.26	-1.96	-3.92	
V10-4B0-1	15.2	15.2	15.5	15.5	16	14	15.9	16.7	-5.26	7.89	-2.58	-7.74	
V10-4B0-2	15.2	15.2	15.3	15.3	15.7	15.7	16.1	16.1	-3.29	-3.29	-5.23	-5.23	
V10-4B0-3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.8	15.8	15.9	15.4	-3.27	-3.27	-3.92	-0.65	
V10-4B0-4	15.2	15.2	15.6	15.6	15.6	14.9	15.7	15	-2.63	1.97	-0.64	3.85	
V11-4B0-1	15.3	15.3	15.6	15.6	15	15.9	16	16.3	1.96	-3.92	-2.56	-4.49	
V11-4B0-2	15.1	15.1	15.8	15.8	15.7	16.1	16.2	17	-3.97	-6.62	-2.53	-7.59	
V11-3B0-3	15.2	15.2	15.4	15.4	15.1	15.2	15.3	16.9	0.66	0.00	0.65	-9.74	
V11-3B0-4	15.2	15.2	15.5	15.5	15.8	15.7	16.3	16.3	-3.95	-3.29	-5.16	-5.16	
V12-3B0-1	15.2	15.2	15.4	15.4	15.5	15.9	15.8	16.5	-1.97	-4.61	-2.60	-7.14	
V12-3B0-2	15.2	15.2	15.4	15.4	15.9	15.8	15.8	16.4	-4.61	-3.95	-2.60	-6.49	
V12-3B0-3	15.2	15.2	15.2	15.5	15.6	15	16.4	17.4	-2.63	1.32	-7.89	-12.26	
V12-3B0-4	15.1	15.1	15.5	15.5	15.2	15.9	16.3	15.8	-0.66	-5.30	-5.16	-1.94	
V13-2L(2)-1	15.2	15.2	15.4	15.4	15.5	15.2	16	16.6	-1.97	0.00	-3.90	-7.79	
V13-2L(2)-2	15.2	15.2	15.7	15.7	15.4	15.8	15.6	16.6	-1.32	-3.95	0.64	-5.73	
V13-1L-3	15.2	15.2	15.5	15.5	15.3	15.9	16	15.7	-0.66	-4.61	-3.23	-1.29	
V13-1L-4	15.3	15.3	15.5	15.5	15.8	16.1	16.3	17	-3.27	-5.23	-5.16	-9.68	
										% ERROR MÁXIMO		7.89	
										% ERROR MÍNIMO		-12.99	

Tabla 27: Error del equipo al escanear espesores en vigas de 15cm.

d. UBICACIÓN DE VACÍOS

Para el caso de ubicación de las esferas introducidas se analizó las cuatro caras longitudinales de cada viga. Estos datos están adjunto en el anexo digital 1, debido a la gran cantidad de datos. El adjunto contiene un resumen total de las vigas, como también el análisis de cada esfera en cada viga a detalle.

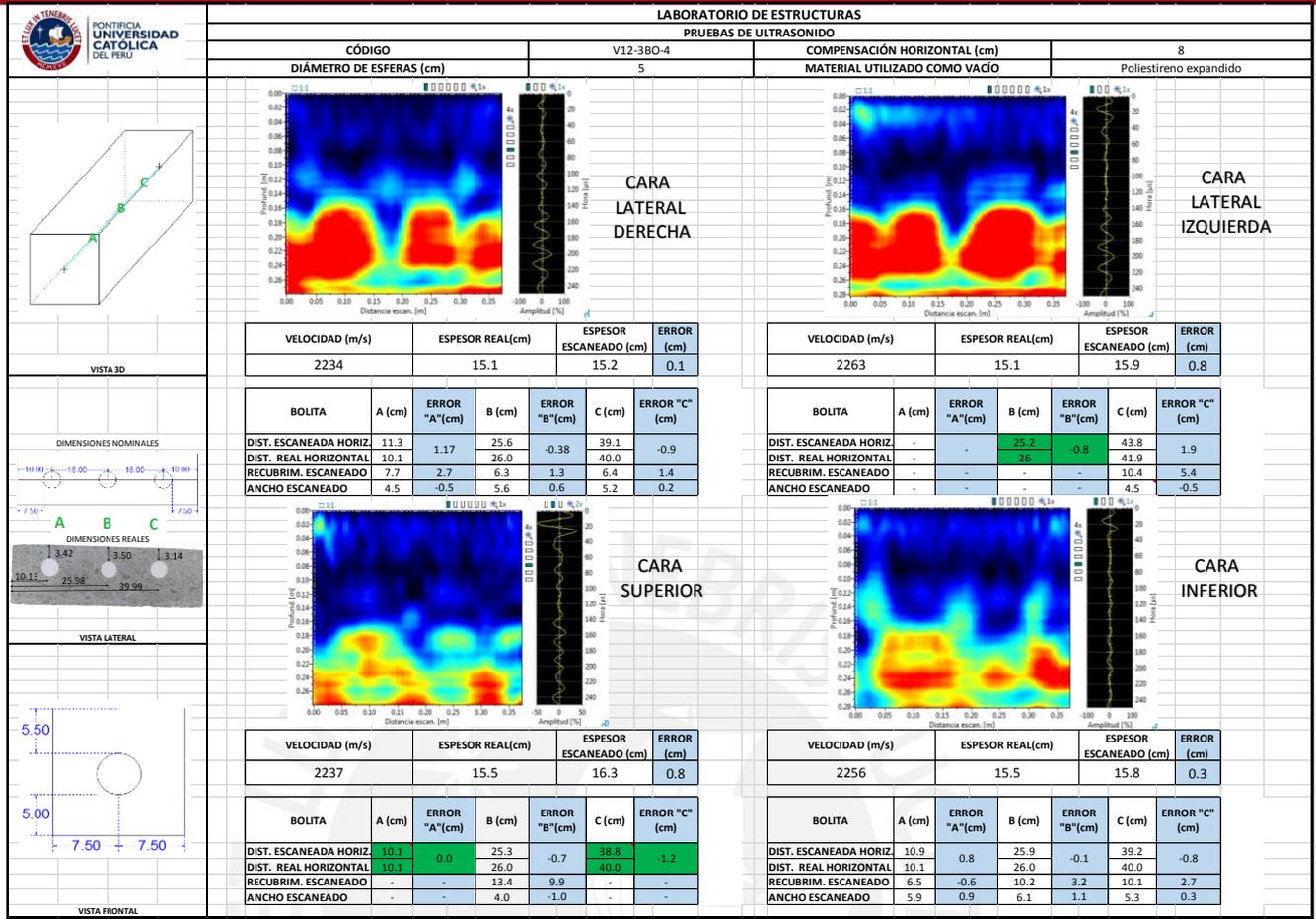


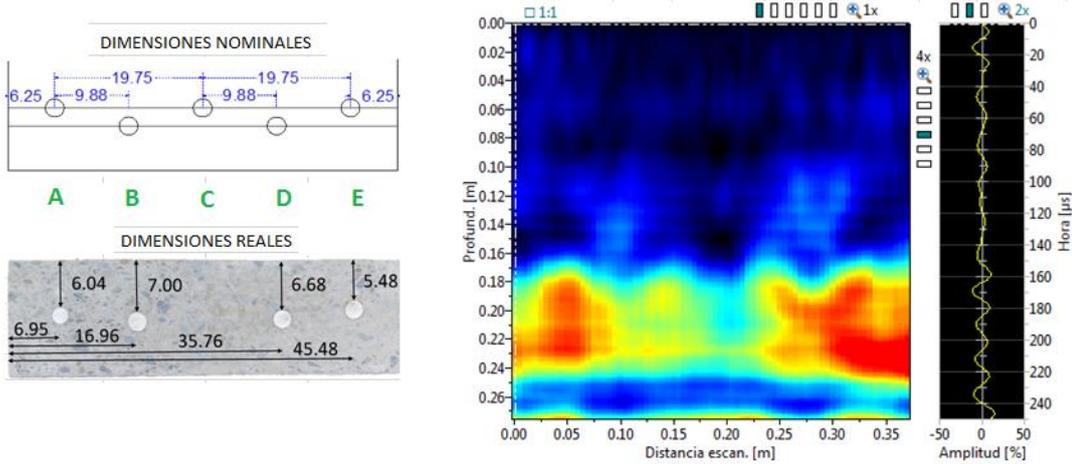
Figura 63: Detalle de los escaneos con pulso eco (anexo digital 1).

En la parte superior de cada hoja de cálculo se detalla el código de cada viga, la compensación horizontal dada, el diámetro de las esferas dentro del espécimen, y el material utilizado para que se asemeje a un vacío (véase figura 63).

Por otra parte, en la zona izquierda de cada hoja de cálculo se aprecian las vistas de la viga: vista 3D (con identificación de cada vacío), vista lateral (con medidas nominales y reales) y la vista frontal (con dimensiones nominales).

Por último, en la parte central de la hoja de cálculo se encuentra el SCAN B de cada cara lateral de la viga con su respectiva identificación. La cara superior es la superficie que estuvo libre de encofrado, y la cara inferior el opuesto a esta.

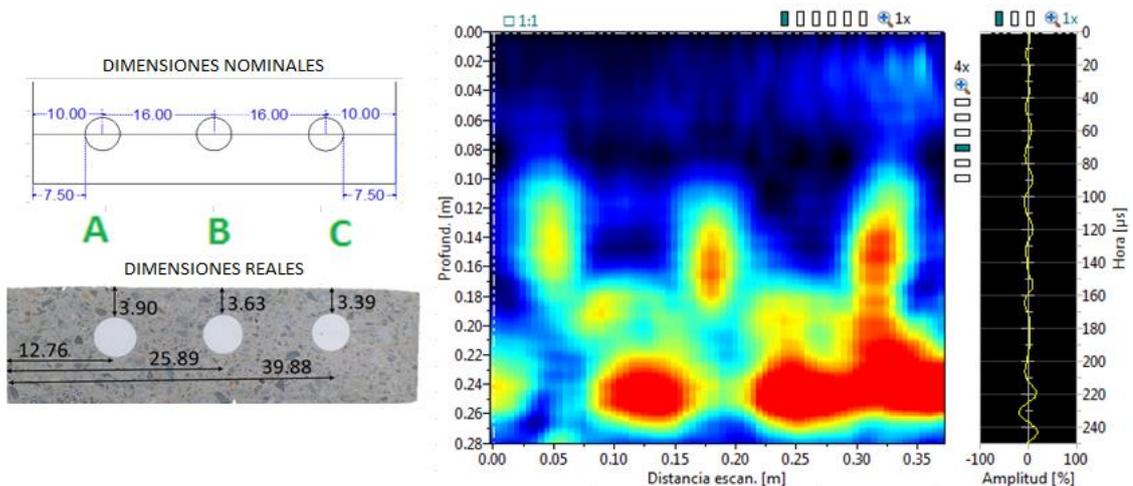
En cada escaneo se apuntó la velocidad de la onda S, el espesor real y el escaneado por el equipo. También, por cada esfera encontrada se analizó su ubicación según lo siguiente: distancia horizontal (sumando la compensación horizontal), recubrimiento escaneado y el diámetro escaneado. El ERROR es la resta entre la dimensión real y la dimensión escaneada en todos los casos, por ejemplo, el ERROR del recubrimiento es la resta del recubrimiento escaneado con el recubrimiento real.



VELOCIDAD (m/s)	ESPESOR REAL(cm)	ESPESOR ESCANEADO (cm)	ERROR (cm)
2205	15.4	16.3	0.9

BOLITA	A (cm)	ERROR "A"(cm)	B (cm)	ERROR "B"(cm)	C (cm)	ERROR "C"(cm)	D (cm)	ERROR "D"(cm)	E (cm)	ERROR "E"(cm)
DIST. ESCANEADA HORIZ.	-	-	18.1	1.1	27.2	1.2	36.6	0.8	-	-
DIST. REAL HORIZONTAL	-	-	17.0	-	26.0	-	35.8	-	-	-
RECUBRIM. ESCANEADO	-	-	11.4	4.4	-	-	10.0	3.3	-	-
ANCHO ESCANEADO	-	-	4.0	1.5	-	-	4.2	1.7	-	-

Figura 64: SCAN B - esferas de 2.5cm: V7-2L(2)-1 (Cara superior).



VELOCIDAD (m/s)	ESPESOR REAL(cm)	ESPESOR ESCANEADO (cm)	ERROR (cm)
2244	15.5	17.4	1.9

BOLITA	A (cm)	ERROR "A"(cm)	B (cm)	ERROR "B"(cm)	C (cm)	ERROR "C" (cm)
DIST. ESCANEADA HORIZ.	12.6	-0.2	26.0	0.1	39.8	-0.1
DIST. REAL HORIZONTAL	12.8	-	25.9	-	39.9	-
RECUBRIM. ESCANEADO	9.9	3.3	11.5	4.6	6.3	-0.8
ANCHO ESCANEADO	5.8	0.8	6.7	1.7	6.3	1.3

Figura 65: SCAN B – esferas de 5cm: V12-3Bo-3 (Cara inferior).

El resumen de todos los errores para las dimensiones analizadas se adjuntan en el anexo 7: Resumen de los escaneos de las vigas. Como un resumen de este anexo, se detalla los errores máximos encontrados por cada tipo de viga en las tablas 28 y 29. Tener en cuenta que no se ha tomado como referencia de los resultados las esferas ubicadas dentro de la zona muerta y/o campo cercano.

FORMA Y DIMENSIONES DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO	TIPO DE VIGA	ERROR ESCANEADO HORIZONTAL MÁXIMO (cm)		FORMA Y DIMENSIONES DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO	TIPO DE VIGA	ERROR ESCANEADO RECUBRIMIENTO MÁXIMO (cm)	
Esfera de 1.4cm de diámetro	VIGA TIPO 1	2.7	4.3	Esfera de 1.4cm de diámetro	VIGA TIPO 1	4.9	6.4
	VIGA TIPO 2	4.3			VIGA TIPO 2	6.4	
	VIGA TIPO 3	2.6			VIGA TIPO 3	1.0	
Esfera de 2.5cm de diámetro	VIGA TIPO 4	4.0	4.0	Esfera de 2.5cm de diámetro	VIGA TIPO 4	7.7	7.7
	VIGA TIPO 5	3.6			VIGA TIPO 5	5.4	
	VIGA TIPO 6	3.9			VIGA TIPO 6	5.5	
Esfera de 5cm de diámetro	VIGA TIPO 7	2.6	3.3	Esfera de 5cm de diámetro	VIGA TIPO 7	5.4	5.7
	VIGA TIPO 8	3.3			VIGA TIPO 8	5.7	
Cubo de 5cm de lado	ADICIONALES	2.8	2.8	Cubo de 5cm de lado	ADICIONALES	0.0	2.7
Cubo de 7cm de lado		1.9		Cubo de 7cm de lado		2.7	
Cubo de 10cm de lado		-		Cubo de 10cm de lado		-	

Tabla 28 y 29: Error máximo escaneado: ubicación horizontal de las esferas / profundidad del vacío.

Como un adicional, se analizó el diámetro aproximado de las esferas (véase tabla 30).

FORMA Y DIMENSIONES DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO	TIPO DE VIGA	ERROR ESCANEADO MÁXIMO DIÁMETRO DE ESFERAS (cm)	
Esfera de 1.4cm de diámetro	VIGA TIPO 1	4.0	4.0
	VIGA TIPO 2	3.3	
	VIGA TIPO 3	3.0	
Esfera de 2.5cm de diámetro	VIGA TIPO 4	2.6	4.2
	VIGA TIPO 5	4.2	
	VIGA TIPO 6	3.4	
Esfera de 5cm de diámetro	VIGA TIPO 7	2.8	2.8
	VIGA TIPO 8	2.0	
Cubo de 5cm de lado	ADICIONALES	0.4	1.4
Cubo de 7cm de lado		1.4	
Cubo de 10cm de lado		-	

Tabla 30: Error máximo escaneado: diámetro de esferas.

6.2. MUROS DE CONCRETO

6.2.1. ENSAYOS EN CONCRETO FRESCO Y ENDURECIDO

Los resultados en el concreto en estado fresco y endurecido, de los muros fabricados, cumplen con los parámetros de control establecidos en la tabla 12.

Día de vaciado	Hora de fabricación	Código de mezcla	Fabricación	w/c	Slump (pulg)	Contenido de aire (%)	Rendimiento	Días del concreto	Resistencia (kg/cm ²)
03/11/2014	1:30pm	M1	1 muro y 2 probetas	0.7	5.2	2.2	1.03	28	298.9
	3pm	M2	1 muro y 2 probetas	0.7	6.0	2	1.03	28	284.8
	4:30pm	M3	1 muro y 2 probetas	0.6	4.1	2.1	1.03	28	360.2
05/11/2014	1:30pm	M4	1 muro y 2 probetas	0.7	4.0	2.5	1.04	28	327.0
	3pm	M5	1 muro y 2 probetas	0.6	4.0	2.2	1.04	28	372.9
	4:30pm	M6	1 muro y 2 probetas	0.6	5.5	2.1	1.03	28	339.2
Total			6 muros y 12 probetas						

Tabla 31: Ensayos de control en muros de concreto.

6.2.2. ESCANEADO CON ULTRASONIDO (ONDAS P)

Como se dio en el caso de las vigas, se analizó la velocidad de onda P en las zonas de los elementos introducidos, como también en las zonas de concreto puro. Después de ello, se procedió a comparar la velocidad en la zona de los materiales introducidos respecto a la velocidad promedio de las zonas de concreto analizadas. En las tablas 32, 33 y 34, al igual que en las vigas, se resalta de color amarillo, las variaciones mayores al 2% respecto al concreto puro.

Material	Muro-Tipo	Zona	Velocidad (m/s)	Error contra concreto puro (%)
Poliestireno expandido (5x5x30 cm)	M1-T1	Izquierda	4056	-4.27
	M1-T1	Central	4105	-3.12
	M1-T1	Derecha	4052	-4.37
	M3-T1	Izquierda	4085	-4.82
	M3-T1	Central	4098	-4.52
	M3-T1	Derecha	4092	-4.66
Esferas de plástico (φ7 cm)	M1-T1	Izquierda	4164	-1.72
	M1-T1	Derecha	4124	-2.67
	M3-T1	Izquierda	4217	-1.75
	M3-T1	Derecha	4210	-1.91
Botella de plástico (24cm x φ5cm)	M1-T1	Izquierda	4072	-3.89
	M1-T1	Central	4092	-3.42
	M1-T1	Derecha	4066	PICO BOTELLA
	M3-T1	Izquierda	4174	-2.75
	M3-T1	Central	4188	-2.42
	M3-T1	Derecha	4310	PICO BOTELLA
Concreto puro	M1-T1		4237	0.00
Concreto puro (6 meses después)	M1-T1		4231	-0.14
Concreto puro	M3-T1		4292	0.00
Concreto puro (6 meses después)	M3-T1		4282	-0.23

Tabla 32: Resultados de la velocidad onda P en muros tipo 1.

Según la tabla 32, el poliestireno expandido y la botella se lograron encontrar. Sin embargo, tres de las cuatro esferas de plástico no fueron ubicadas. Se aprecia que el error en las esferas no es tan alto como al de los demás elementos, a pesar de su dimensión de 7 cm.

Según la tabla 33, para el caso de los muros 2 y 4, el cilindro de cartón fue ubicado debido a sus dimensiones y su forma tubular, ya que le permitió una mayor reflexión de la energía de la onda. Por otro lado, los cubitos de poliestireno expandido fueron ubicados dos de los cuatros colocados, algo parecido a las esferas de plástico. El poliestireno expandido de 15cm no fue ubicado en uno de los puntos analizados (uno de seis).

Material	Muro-Tipo	Zona	Velocidad (m/s)	Error contra concreto puro (%)
Envase de cartón (23cm x ϕ 7cm)	M2-T2	Izquierda	3931	-5.35
	M2-T2	Central	3975	-4.29
	M2-T2	Derecha	4052	-2.43
	M4-T2	Izquierda	3918	-6.29
	M4-T2	Central	4013	-4.02
	M4-T2	Derecha	4006	-4.19
Cubos de poliestireno expandido (5cm)	M2-T2	Izquierda	4032	-2.91
	M2-T2	Derecha	4078	-1.81
	M4-T2	Izquierda	4112	-1.65
	M4-T2	Derecha	4013	-4.02
Poliestireno expandido (5x5x15cm)	M2-T2	Izquierda	4052	-2.43
	M2-T2	Central	3982	-4.12
	M2-T2	Derecha	4058	-2.29
	M4-T2	Izquierda	4098	-1.99
	M4-T2	Central	4065	-2.77
	M4-T2	Derecha	4045	-3.25
Concreto puro	M2-T2		4153	0.00
Concreto puro (6 meses después)	M2-T2		4177	0.58
Concreto puro	M4-T2		4181	0.00
Concreto puro (6 meses después)	M4-T2		4195	0.33

Tabla 33: Resultados de la velocidad onda P en muros tipo 2.

Material	Muro-Tipo	Zona	Velocidad (m/s)	Error contra concreto puro (%)
Tubo PVC ($\phi 2''$)	M5-T3	Izquierda	4181	-2.02
	M5-T3	Central	4125	-3.33
	M5-T3	Derecha	4139	-3.00
	M6-T3	Izquierda	4065	-4.64
	M6-T3	Central	4188	-1.76
	M6-T3	Derecha	4139	-2.91
Tubo PVC ($\phi 3''$)	M5-T3	Izquierda	3931	-7.87
	M5-T3	Central	3882	-9.02
	M5-T3	Derecha	3870	-9.30
	M6-T3	Izquierda	3925	-7.93
	M6-T3	Central	3994	-6.31
	M6-T3	Derecha	3956	-7.20
Acero ($\phi 1''$)	M5-T3	Izquierda	4244	-0.54
	M5-T3	Central	4195	-1.69
	M5-T3	Derecha	4274	0.16
	M6-T3	Izquierda	4303	0.94
	M6-T3	Central	4252	-0.26
	M6-T3	Derecha	4288	0.59
Concreto puro	M5-T3		4267	0.00
Concreto puro (6 meses después)	M5-T3		4242	-0.59
Concreto puro	M6-T3		4263	0.00
Concreto puro (6 meses después)	M6-T3		4227	-0.84

Tabla 34: Resultados de la velocidad onda P en muros tipo 3.

Por último, en la tabla 34, los tubos de PVC son localizados en todos los puntos escaneados, excepto un punto de PVC de 2". Sin embargo, el acero no es ubicable, ya que la reflexión en este material no es alta como el caso de concreto - aire.

Para concluir, la variación de velocidad de onda P en los muros después de 6 meses fue como máximo de 0.84%, el cual no supera el 2% que se eligió para el escaneo de vacíos.

6.2.3. ESCANEO CON PULSO ECO (ONDA S)

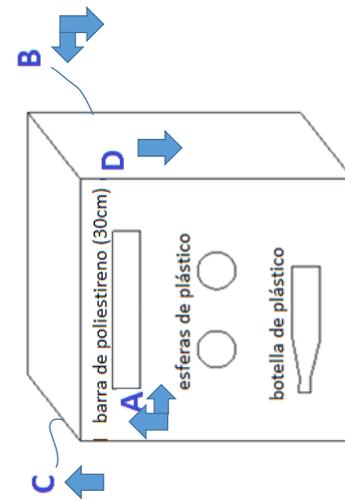
En la figura 66, se muestra un resumen completo de los muros fabricados. Para cada franja escaneada se ha analizado:

- Profundidad de la zona muerta y campo cercano.
- Velocidad de la onda S.
- Espesor del muro (escaneado y real).
- Ubicación de los vacíos (horizontal y profundidad).

Además escanear un posible ancho que los materiales introducidos puedan tener dependiendo de la experiencia del operador. Estos anchos no son fiables, ya que depende de la ganancia de colores que el operador utilice, según su criterio, en cada medición.

RESUMEN DE MUROS

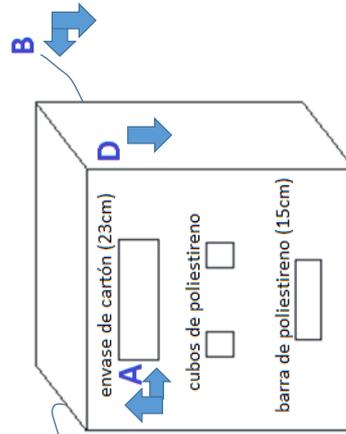
A CARA FRONTAL (escaneo hacia la derecha y hacia arriba)
B CARA TRASERA (escaneo hacia la derecha y hacia abajo)



MURO 1 (w/c=0.7)

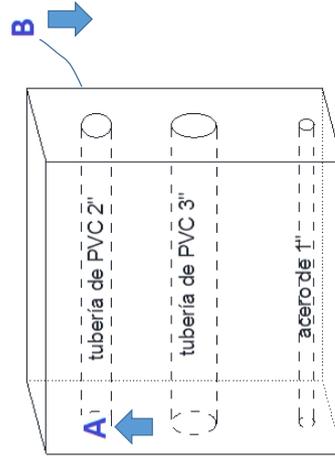
[M1-A \(derecha\)](#)
[M1-A \(arriba\)](#)
[M1-B \(derecha\)](#)
[M1-B \(abajo\)](#)
[M1-C y D](#)

C CARA LATERAL (escaneo hacia arriba)
D CARA TRASERA (escaneo hacia abajo)



MURO 2 (w/c=0.7)

[M2-A \(derecha\)](#)
[M2-A \(arriba\)](#)
[M2-B \(derecha\)](#)
[M2-B \(abajo\)](#)
[M2-C y D](#)



MURO 3 (w/c=0.6)

[M3-A \(arriba\)](#)
[M3-B \(abajo\)](#)

MURO 4 (w/c=0.7)

[M4-A \(derecha\)](#)
[M4-A \(arriba\)](#)
[M4-B \(derecha\)](#)
[M4-B \(abajo\)](#)
[M4-C y D](#)

MURO 5 (w/c=0.6)

[M5-A \(derecha\)](#)
[M5-A \(arriba\)](#)
[M5-B \(derecha\)](#)
[M5-B \(abajo\)](#)
[M5-C y D](#)

MURO 6 (w/c=0.6)

[M6-A \(arriba\)](#)
[M6-B \(abajo\)](#)

FECHA DE VACIADO (MURO 1,2,3)
03/11/2014
ANÁLISIS : 30 a 32 días

FECHA DE VACIADO (MURO 4,5,6)
05/11/2014
ANÁLISIS : 33 a 34 días

Figura 66: Resumen de muros.

a. PROFUNDIDAD DE LA ZONA MUERTA Y CAMPO CERCANO

Agua/ Cemento (w/c)	MURO	ZONA MUERTA (cm)				CAMPO CERCANO (cm)			
		FRANJA				FRANJA			
		1	2	3	4	1	2	3	4
0.7	M1-A (derecha)	1.8	1.8	1.9	1.6	3.8	3.7	3.9	3.5
	M1-A (arriba)	1.8	1.8	1.8	1.6	3.8	3.5	3.7	3.2
	M1-B (derecha)	1.8	1.7	1.6	1.7	3.7	3.5	3.3	3.6
	M1-B (abajo)	1.7	1.7	1.5	1.7	3.5	3.5	3.2	3.5
	M1-C y D	1.6	1.7	-	-	3.1	3.6	-	-
	M2-A (derecha)	1.7	1.7	1.7	1.8	3.5	3.5	3.4	3.6
	M2-A (arriba)	1.7	1.7	1.7	1.6	3.4	3.6	3.3	3.4
	M2-B (derecha)	1.6	1.5	1.6	1.5	3.4	3	3	3.1
	M2-B (abajo)	1.4	1.5	1.6	1.6	3	2.8	3.4	3.1
	M2-C y D	1.5	1.6			3	3.4		
	M4-A (derecha)	1.8	1.8	1.7	1.7	3.6	3.6	3.6	3.6
	M4-A (arriba)	1.7	1.9	1.8	1.7	3.6	3.6	3.5	3.5
	M4-B (derecha)	1.7	1.5	1.5	1.4	3.6	3.1	3	3.1
	M4-B (abajo)	1.8	1.7	1.7	1.8	3.6	3.5	3.5	3.6
	M4-C y D	1.6	1.6	-	-	3	3.1	-	-
	PROMEDIO (cm)				1.7	PROMEDIO (cm)			
DESV. ESTANDAR (cm)				0.1	DESV. ESTANDAR (cm)				0.3
COEF. VARIACIÓN (%)				7.0	COEF. VARIACIÓN (%)				7.5

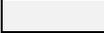
			%
	Concreto con presencia de zona muerta y campo cercano.	33 datos	61.11
	Concreto sin presencia de zona muerta y campo cercano.	21 datos	38.89

Tabla 35: Zona muerta y campo cercano muros (w/c=0.7).

Agua/ Cemento (w/c)	MURO	ZONA MUERTA (cm)				CAMPO CERCANO (cm)			
		FRANJA				FRANJA			
		1	2	3	4	1	2	3	4
0.6	M3-A (derecha)	1.9	1.8	1.8	1.8	3.8	3.7	3.7	3.7
	M3-A (arriba)	1.8	1.9	1.8	1.8	3.6	3.7	3.7	3.8
	M3-B (derecha)	1.8	1.8	1.8	1.8	3.8	3.6	3.6	3.6
	M3-B (abajo)	1.8	1.8	1.8	1.8	3.8	3.7	3.6	3.6
	M3-C y D	1.8	1.8	-	-	3.7	3.7	-	-
	M5-A (derecha)	1.7	1.6	1.5	-	3.5	3.5	3.4	-
	M5-A (arriba)	1.7	1.8	1.8	1.6	3.6	3.6	3.6	3.1
	M5-B (derecha)	1.6	1.6	1.6	-	3.4	3.4	3.3	-
	M5-B (abajo)	1.6	1.5	1.7	1.7	3.1	3	3.6	3.5
	M6-A (derecha)	1.5	1.6	1.6	-	3.3	3.3	3.3	-
	M6-A (arriba)	1.4	1.4	1.5	1.4	2.9	2.9	2.9	2.9
	M6-B (derecha)	1.6	1.6	1.6	-	3.4	3.3	3.3	-
	M6-B (abajo)	1.6	1.6	1.6	1.7	3.4	3.4	3.5	3.6
	PROMEDIO (cm)				1.7	PROMEDIO (cm)			
DESV. ESTANDAR (cm)				0.1	DESV. ESTANDAR (cm)				0.3
COEF. VARIACIÓN (%)				8.0	COEF. VARIACIÓN (%)				7.5

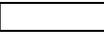
			%
	Concreto con presencia de zona muerta y campo cercano.	29 datos	63.04
	Concreto sin presencia de zona muerta y campo cercano.	17 datos	36.96

Tabla 36: Zona muerta y campo cercano muros (w/c=0.6).

Como en el caso de las vigas se analizó la dimensión de la zona muerta, y la zona muerta más el campo cercano. Sin embargo, ya que los muros son de diferentes relaciones agua cemento, estas fueron analizadas en dos casos (véase tabla 35 y 36).

En el caso de los muros, según la tabla 35 y 36, la presencia de zona muerta disminuyó (de 78.37% en las vigas, a 63.04%, en los muros). Por último, en el caso de muros con relación agua cemento de 0.6, la zona muerta y campo cercano no son altamente variables en comparación a lo obtenido en las vigas y muros con relación agua cemento 0.7. También, la presencia de estas zonas es parecida en ambas relaciones agua cemento (61.11% y 63.04%, en $w/c = 0.7$ y 0.6 respectivamente).

b. VELOCIDAD DE ONDA

Se analizó la velocidad de la onda S en dos grupos según su relación agua/cemento (w/c): 0.6 y 0.7.

Agua/cemento (w/c)	MURO	VELOCIDAD ONDA S (m/s)	Agua/cemento (w/c)	MURO	VELOCIDAD ONDA S (m/s)
0.7	1	2250	0.6	3	2232
	2	2107		5	2179
	4	2175		6	2085
	PROMEDIO	2177		PROMEDIO	2165

Tablas 37 y 38: Velocidad de la onda S en los muros con $w/c=0.7$ / $w/c=0.6$.

Como se aprecia en las tablas 37 y 38, el promedio de las velocidades en ambas relaciones son parecidas. Es por ello que se utiliza la Onda P en vez de la onda S para obtener una correlación entre resistencia a la compresión y velocidad de pulso. Sin embargo, para discontinuidades se usa las ondas S tipo eco, ya que su reflexión es mayor que de las ondas P debido a que estas no se desplazan por el aire.

c. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR

Para el caso de los muros, se ha buscado el error entre la dimensión real de cada muro, con lo escaneado. Las tablas 39 y 40, muestran los errores obtenidos según la relación agua cemento, en el ancho de 25 centímetros; y la tabla 41, el error obtenido en el ancho de 50 centímetros.

w/c	MURO	ESPESOR REAL (cm)	ESPESOR ESCANEADO (cm)				ERROR SEGÚN EL ESPESOR REAL (%)			
0.7	M1-A (derecha)	25	24.8	24.6	24.1	25.5	-0.80	-1.60	-3.60	2.00
	M1-A (arriba)		24.5	24.5	24.3	24.3	-2.00	-2.00	-2.80	-2.80
	M1-B (derecha)		24.9	24.7	24.7	24.7	-0.40	-1.20	-1.20	-1.20
	M1-B (abajo)		24.5	24.6	24.4	24.6	-2.00	-1.60	-2.40	-1.60
	M2-A (derecha)	25	23.3	24.6	23.1	22.9	-6.80	-1.60	-7.60	-8.40
	M2-A (arriba)		23	24.8	23	23	-8.00	-0.80	-8.00	-8.00
	M2-B (derecha)		24.4	23.2	23.3	24.1	-2.40	-7.20	-6.80	-3.60
	M2-B (abajo)		23.1	23.5	22.8	23.4	-7.60	-6.00	-8.80	-6.40
	M4-A (derecha)	24.8	24.4	23.9	23.9	23.8	-1.61	-3.63	-3.63	-4.03
	M4-A (arriba)		23.5	23.4	23.9	23.9	-5.24	-5.65	-3.63	-3.63
	M4-B (derecha)		23.4	23.7	23.7	23.8	-5.65	-4.44	-4.44	-4.03
	M4-B (abajo)		23.6	23.6	23.7	24.8	-4.84	-4.84	-4.44	0.00
							ERROR MÁXIMO (%)		2.00	
							ERROR MÍNIMO (%)		-8.80	

Tabla 39: Error del equipo al escanear espesores de 25 cm (w/c=0.7).

Según la tabla 39, en el caso de relación agua cemento de 0.7, el rango de dispersión es de -8.8 a 2%. Por lo tanto, la máxima dispersión fue de 8.8%.

w/c	MURO	ESPESOR REAL (cm)	ESPESOR ESCANEADO (cm)				ERROR SEGÚN EL ESPESOR REAL (%)			
0.6	M3-A (derecha)	25	24.1	24.1	23.9	25	-3.60	-3.60	-4.40	0.00
	M3-A (arriba)		24.1	23.8	23.8	23.9	-3.60	-4.80	-4.80	-4.40
	M3-B (derecha)		24.3	24.2	24.2	24.2	-2.80	-3.20	-3.20	-3.20
	M3-B (abajo)		24.9	23.8	22.9	24	-0.40	-4.80	-8.40	-4.00
	M5-A (arriba)	25.2	24.6	23.4	22.8	22.8	-2.38	-7.14	-9.52	-9.52
	M5-B (abajo)		24.6	23.3	23.5	24.1	-2.38	-7.54	-6.75	-4.37
	M6-A (arriba)	25.1	22.5	22.8	22.8	22.4	-10.36	-9.16	-9.16	-10.76
	M6-B (abajo)		23.6	21.9	22.6	23.1	-5.98	-12.75	-9.96	-7.97
							ERROR MÁXIMO (%)		0.00	
							ERROR MÍNIMO (%)		-12.75	

Tabla 40: Error del equipo al escanear espesores de 25 cm (w/c=0.6).

Por otro lado, en la tabla 40, para relaciones agua cemento de 0.6, el rango de dispersión es de 0 a 12.75%. Por lo tanto, la máxima dispersión fue de 12.75%.

En la tabla 41 no se pudo obtener resultados en los muros 5 y 6 para la dimensión de 50 cm, ya que en las caras de análisis de estos muros, se encuentran parte de la salida de los tubos de PVC instalados. Por lo tanto, debido a que no se tuvo muchas franjas de escaneo y, además de pocos resultados, se unió el caso de relación agua cemento 0.6 y 0.7 para este ancho (véase tabla 41).

w/c	MURO	ESPESOR REAL (cm)	ESPESOR ESCANEADO (cm)		ERROR SEGÚN EL ESPESOR REAL (%)	
0.7	M1-C y D	50	51	47.7	2.00	-4.60
	M2-C y D	50.2	47.7	47.8	-4.98	-4.78
	M4-C y D	49.6	48.6	47.2	-2.02	-4.84
0.6	M3-C y D	50	47.6	49.5	-4.80	-1.00
					ERROR MÁXIMO (%)	2.00
					ERROR MÍNIMO (%)	-4.98

Tabla 41: Error del equipo al escanear espesores de 50 cm.

Por último, en la tabla 41, se encontró una variación de -4.98 a 2%. Por lo que la variación máxima fue de 4.98%.

d. UBICACIÓN DE VACÍOS

Como se dio en el caso de las vigas, los datos a detalle de los escaneos de los muros, están adjuntos en el anexo digital 2. El adjunto contiene un resumen total de los muros escaneados, como también el análisis de cada vacío.

En la parte superior de cada hoja de cálculo se detalla el código de cada muro, la compensación horizontal dada, el tipo de muro, y los materiales usados que se usaron como vacíos (véase figura 67).

Por otra parte, en la zona izquierda se aprecian las vistas del muro: vista 3D (con el material de cada vacío), vista lateral (con medidas nominales) y la vista frontal (con las franjas escaneadas).

Por último, en la parte central de la hoja de cálculo se encuentra el SCAN B de cada cara franja escaneada con su debida identificación.

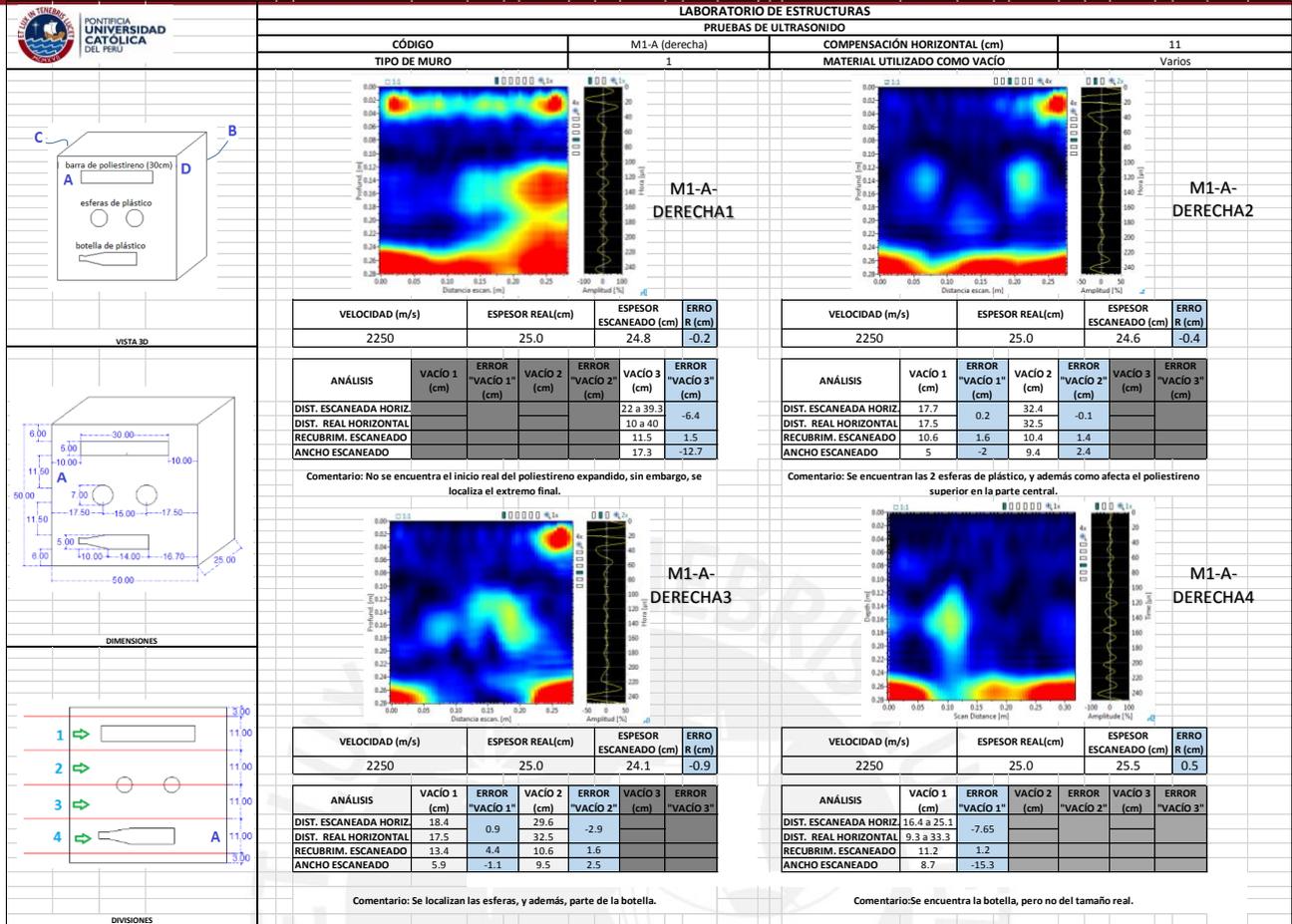


Figura 67: Detalle de los escaneos con pulso eco (anexo digital 2).

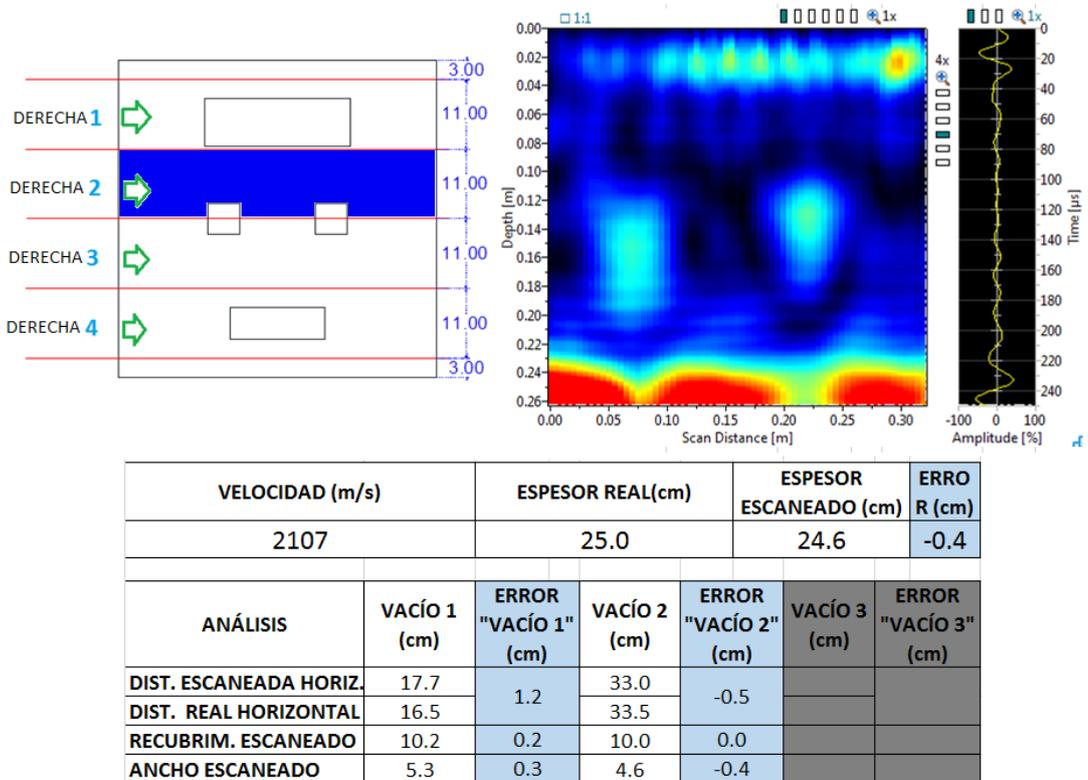
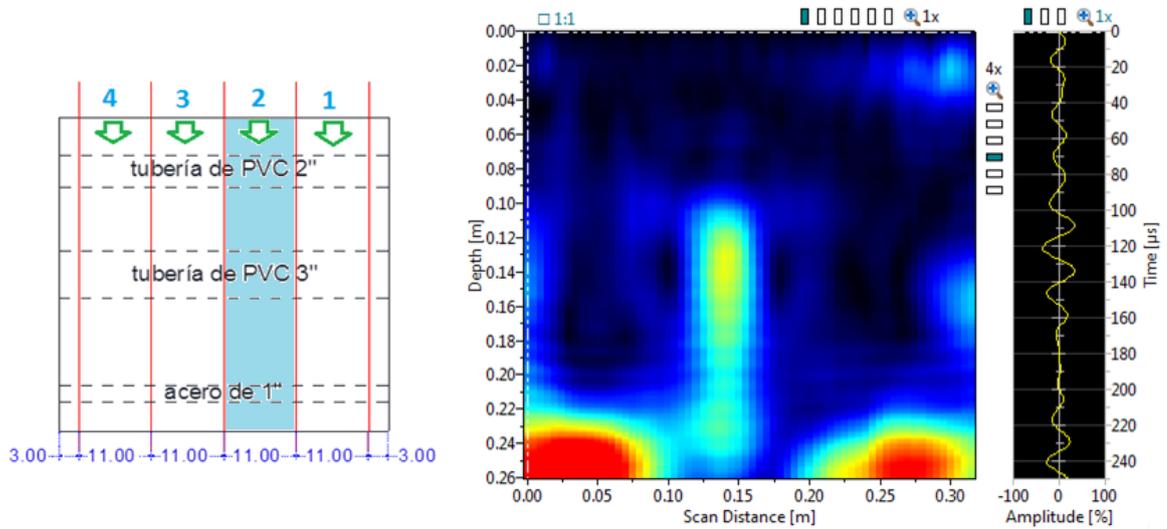


Figura 68: Scan B – Cubos de poliestireno expandido: M2-A-DERECHA2.



VELOCIDAD (m/s)	ESPESOR REAL(cm)		ESPESOR ESCANEADO (cm)	ERRO R (cm)
2085	25.1		22.6	-2.5

ANÁLISIS	VACÍO 1 (cm)	ERROR "VACÍO 1"	VACÍO 2 (cm)	ERROR "VACÍO 2"	VACÍO 3 (cm)	ERROR "VACÍO 3"
DIST. ESCANEADA HORIZ.	11.2	2.7	25.0	0.0	41.8	-2.2
DIST. REAL HORIZONTAL	8.5		25.0		44.0	
RECUBRIM. ESCANEADO	10.0	0.0	10.5	1.8	13.0	1.8
ANCHO ESCANEADO	-	-	5.8	-1.8	-	-

Figura 69: Scan B – Tuberías de PVC y acero: M6-B-ABAJO2.

En las siguientes tablas (42 a la 50), los comentarios están coloreados de verde, amarillo, blanco y rojo. El color verde indica que se encontraron satisfactoriamente los materiales introducidos; amarillo, que el material introducido fue ubicado pero no en su totalidad, o se ubicó en otra franja escaneada; blanco, que está fuera de la zona escaneada; y rojo, cuando el material introducido no fue localizado.

En el caso de especímenes de longitud considerable: barras de poliestireno expandido, botellas de plástico o envases de cartón; el error escaneado horizontal, indica cuan alejado está el centro real del material, con el centro de lo escaneado. Por otra parte, el error escaneado en el ancho de estos materiales, indica el tamaño de la longitud del espécimen perdido en el escaneo.

IMPORTANTE: Tener en cuenta que en las siguientes tablas (42 al 50), el ERROR MAX y MIN de los escaneos horizontales (horizontal en dirección del escaneo) son solamente de análisis DERECHA (véase figura 60) para los muros M1, M2, M3 y M4. No se ha tomado ARRIBA y ABAJO, ya que el hilo de nylon, a pesar de estar tensado, tiende a pandearse por efectos del vaciado, ya que el concreto fresco es más denso que los materiales colocados.

✚ POLIESTIRENO EXPANDIDO DE 30 x 5 x 5cm

w/c	CÓDIGO DE MURO	FRANJA	MURO TIPO 1 - POLIESTIRENO EXPANDIDO DE 30x5x5cm			COMENTARIO
			ERROR ESCANEADO HORIZONTAL (cm)	ERROR ESCANEADO EN EL RECUBRIMIENTO (cm)	ERROR ESCANEADO EN EL ANCHO DE VACÍO (cm)	
			A	A	A	
0.7	M1-A (derecha)	DERECHA1	-6.4	1.5	-12.7	No se encuentra 12.7 cm de poliestireno expandido (Parte final).
	M1-B (derecha)	DERECHA1	-6.7	2.3	-13.4	No se encuentra 13.4 cm de poliestireno expandido (Parte inicial).
0.6	M3-A (derecha)	DERECHA1	0.1	0.8	0.1	Se encuentra todo el poliestireno expandido.
	M3-B (derecha)	DERECHA1	0.2	1.0	0.4	Se encuentra todo el poliestireno expandido.
	ERRORMAX (cm)		0.2	2.3	0.4	
	ERRORMIN (cm)		-6.7	0.8	-13.4	

(*) No se ha considerado M1,M3: ARRIBA, ABAJO ya que parte del espécimen se encuentra fuera del escaneo.

Tabla 42: Resultados del poliestireno expandido de 30x5x5cm.

Según los resultados de la tabla 42, en el muro 1 el escaneo muestra la pérdida de casi la mitad del poliestireno, lo cual no sucede con el muro 3. Esto se debe ya que no necesariamente la energía reflejada de toda la longitud del poliestireno, llega a los receptores del equipo. Sin embargo, en el muro 3, el poliestireno es ubicado en su totalidad. Al parecer en una relación agua cemento 0.6 es mejor la recepción de la señal que una de 0.7.

También, se infiere que a pesar que el material sea de mayor longitud y no esférico, parte de este no es ubicable necesariamente.

✚ ESFERAS DE PLÁSTICO DE 7cm

Según la tabla 43, las esferas son ubicadas en la mayoría de los casos, las zonas resaltadas con amarillo, muestran que solo se encontró una o ninguna esfera de plástico, pero estas esferas faltantes aparecen en otra franja superior o inferior. En este caso no hubo errores considerables por la variación de la relación agua cemento, por lo que lo asumido en el poliestireno expandido del enunciado anterior, es descartado.

w/c	CÓDIGO DE MURO	FRANJA	MURO TIPO 1 - ESFERA DE PLÁSTICO DE 7cm						COMENTARIO
			ERROR ESCANEADO HORIZONTAL (cm)		ERROR ESCANEADO EN EL RECUBRIMIENTO (cm)		ERROR ESCANEADO EN EL ANCHO DE VACÍO (cm)		
			A	B	A	B	A	B	
0.7	M1-A (derecha)	DERECHA2	0.2	-0.1	1.6	1.4	-2.0	2.4	Se encuentran las 2 esferas de plástico y la sombra del poliestireno superior.
		DERECHA3	0.9	-2.9	4.4	1.6	-1.1	2.5	Se encuentran las 2 esferas de plástico y parte de la botella.
	M1-A (arriba)	ARRIBA2	2.0		4.3		-1.2		Se encuentra la esfera de plástico.
		ARRIBA3	3.3		4.2		-2.2		Se encuentra la esfera de plástico.
	M1-B (derecha)	DERECHA2	0.0	-0.3	2.3	3.7	-2.0	-3.1	Se encuentran las 2 esferas de plástico.
		DERECHA3	3.3		-0.9		-1.7		Se encuentra solo 1 esfera, la otra se aprecia en M1-B-DERECHA2.
	M1-B (abajo)	ABAJO2	-2.4		2.4		-3.3		Se encuentra la esfera de plástico.
ABAJO3		-2.2		-0.8		-1.7		Se encuentra la esfera de plástico.	
M1-C y D	ARRIBA	1.7		2.0		-0.2		Se encuentra la esfera de plástico.	
	ABAJO	-2.5		2.5		-0.1		Se encuentra la esfera de plástico.	
0.6	M3-A (derecha)	DERECHA2	0.0	0.0	1.2	2.5	-2.3	-2.8	Se encuentran las 2 esferas de plástico.
		DERECHA3							No se encuentran las 2 esferas de plástico, pero se aprecian en M3-A-DERECHA2.
	M3-A (arriba)	ARRIBA2	1.8		2.5		-3.2		Se encuentra la esfera de plástico.
		ARRIBA3	2.1		-		-		Se encuentra la esfera de plástico por medio de pérdida de energía.
	M3-B (derecha)	DERECHA2	-0.4	0.3	1.6	2.5	-2.4	-2.8	Se encuentran las 2 esferas de plástico.
		DERECHA3							No se encuentran las 2 esferas de plástico, pero se aprecian en M3-B-DERECHA2.
	M3-B (abajo)	ABAJO2	-1.8		1.4		-2.8		Se encuentra la esfera de plástico.
ABAJO3		-2.2		1.2		-3.3		Se encuentra la esfera de plástico.	
M3-C y D	ARRIBA	1.9		-0.5		-0.3		Se encuentra la esfera de plástico.	
	ABAJO	-1.8		-2.0		-2.7		Se encuentra la esfera de plástico.	
ERRORMAX (cm)			3.3		4.4		2.5		
ERRORMIN (cm)			-2.9		-2.0		-3.3		

Tabla 43: Resultados de las esferas de plástico de 7 cm.

🚫 BOTELLA DE PLÁSTICO

w/c	CÓDIGO DE MURO	FRANJA	MURO TIPO 1 - BOTELLA DE PLÁSTICO DE 24cm DE ALTURA Y 5cm DE DIÁMETRO			COMENTARIO
			ERROR ESCANEADO HORIZONTAL (cm)	ERROR ESCANEADO EN EL RECUBRIMIENTO (cm)	ERROR ESCANEADO EN EL ANCHO DE VACÍO (cm)	
			A	A	A	
0.7	M1-A (derecha)	DERECHA4	-7.7	1.2	-15.3	Se encuentra la botella pero no el tamaño real.
	M1-B (derecha)	DERECHA4				No se encuentra la botella.
0.6	M3-A (derecha)	DERECHA4	-1.8	1.5	-3.5	Se encuentra la botella de plástico.
	M3-B (derecha)	DERECHA4	-0.7	2.0	-1.3	Se encuentra la botella de plástico.
ERRORMAX (cm)			-0.7	2.0	-1.3	
ERRORMIN (cm)			-7.7	1.2	-15.3	

(*) No se ha considerado M1,M3: ARRIBA, ABAJO ya que parte del espécimen se encuentra fuera del escaneo.

Tabla 44: Resultados de la botella de plástico.

En la tabla 44, la botella de plástico no es ubicada en el muro 1 en la cara B, sin embargo, en el muro 3, su ubicación es casi precisa. Como se dio en el caso de las barras de poliestireno expandido de 30x5x5 cm, no toda la longitud es ubicable.

🚫 ENVASE DE CARTÓN

En la tabla 45, se aprecia que el envase de cartón es localizado con un bajo error en los muros donde fue colocado.

w/c	CÓDIGO DE MURO	FRANJA	MURO TIPO 2 - ENVASE DE CARTÓN DE 23cm DE ALTURA Y 7cm DE DIÁMETRO			COMENTARIO	
			ERROR ESCANEADO HORIZONTAL (cm)	ERROR ESCANEADO EN EL RECUBRIMIENTO (cm)			ERROR ESCANEADO EN EL ANCHO DE VACÍO (cm)
				A	A		
0.7	M2-A (derecha)	DERECHA1	-1.1	1.1	-2.1	Se encuentra el envase de cartón.	
	M2-A (arriba)	ARRIBA2	0.8	-0.6	-	Se encuentra el envase de cartón.	
		ARRIBA3	1.0	-1.2	-	Se encuentra el envase de cartón.	
	M2-B (derecha)	DERECHA1	-1.4	1.4	-2.8	Se encuentra el envase de cartón.	
	M2-B (abajo)	ABAJO2	1.3	1.9	-	Se encuentra el envase de cartón.	
		ABAJO3				No se encuentra el cartón, ya que no se encuentra en la zona de escaneo.	
M2-C y D	ARRIBA	-0.7	2.0	0.4	Se encuentra el envase de cartón.		
	ABAJO				No se encuentra el cartón, ya que no se encuentra en la zona de escaneo.		
0.6	M4-A (derecha)	DERECHA1	-1.4	-0.3	-2.7	Se encuentra el envase de cartón.	
		ARRIBA2	0.1	0.4	-	Se encuentra el envase de cartón.	
	M4-A (arriba)	ARRIBA3	-3.8	-1.4	-0.8	Se encuentra el envase de cartón con cierto error en ubicación.	
		DERECHA1	-0.3	1.4	-0.6	Se encuentra el envase de cartón.	
	M4-B (derecha)	ABAJO2	4.1	1.3	-	Se encuentra el envase de cartón, se aprecia un cubo de poliestireno cerca.	
		ABAJO3	1.5	1.2	-	Se encuentra el envase de cartón.	
	M4-C y D	ARRIBA	-1.0	-0.3	-	Se encuentra el envase de cartón.	
		ABAJO	4.0	-	-	Se encuentra el envase de cartón.	
	ERRORMAX (cm)			-0.3	2.0	0.4	
	ERRORMIN (cm)			-1.4	-1.4	-2.8	

(* En la mayoría de casos no se ha analizado el ancho del envase de cartón (ARRIBA, ABAJO), ya que parte del espécimen se encuentra fuera del escaneo.

Tabla 45: Resultados del envase de cartón.

✚ CUBOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO

w/c	CÓDIGO DE MURO	FRANJA	MURO TIPO 2-CUBOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO DE 5cm						COMENTARIO
			ERROR ESCANEADO HORIZONTAL (cm)		ERROR ESCANEADO EN EL RECUBRIMIENTO (cm)		ERROR ESCANEADO EN EL ANCHO DE VACÍO (cm)		
			A	B	A	B	A	B	
0.7	M2-A (derecha)	DERECHA2	1.2	-0.5	0.2	0.0	0.3	-0.4	Se encuentran los 2 cubos de poliestireno expandido.
		DERECHA3	0.4	-2.3	3.7	0.7	-1.3	1.9	Se encuentran los 2 cubos de poliestireno expandido.
	M2-A (arriba)	ARRIBA2	1.6		3.3		0.7		Se encuentra el cubo de poliestireno expandido.
		ARRIBA3	2.4		-0.1		-0.7		Se encuentra el cubo de poliestireno expandido.
	M2-B (derecha)	DERECHA2	0.4	0.4	2.0	0.2	0.0	-0.5	Se encuentran los 2 cubos de poliestireno expandido.
		DERECHA3	3.2		0.3		0.8		Se encuentra sólo 1 cubo, el otro se encuentra en M2-B-DERECHA2.
	M2-B (abajo)	ABAJO2	-2.0		1.6		1.1		Se encuentra el cubo de poliestireno expandido.
		ABAJO3	-2.5		1.5		-1.7		Se encuentra el cubo de poliestireno expandido.
	M2-C y D	ARRIBA	1.5		-0.7		2.5		Se encuentra el cubo de poliestireno expandido.
		ABAJO	-0.7		1.3		1.3		Se encuentra el cubo de poliestireno expandido.
	M4-A (derecha)	DERECHA2	3.5		0.5		-0.4		Se encuentra 1 cubo de los 2 dentro de la mezcla.
		DERECHA3							No se encuentra ninguno de los cubos.
	M4-A (arriba)	ARRIBA2	4.4		0.3		0.6		Se encuentra el cubo de poliestireno expandido.
		ARRIBA3							No se encuentra el cubo.
	M4-B (derecha)	DERECHA2	1.8	-3.4	2.0	0.4	0.7	0.7	Se encuentran los 2 cubos de poliestireno expandido.
		DERECHA3							No se encuentran los cubos. Estos aparecen en M4-B-DERECHA2.
	M4-B (abajo)	ABAJO2							No se encuentra el cubo.
		ABAJO3	-5.8		0.4		0.6		Se encuentra el cubo, pero muy pegado al cartón.
M4-C y D	ARRIBA							No se encuentra el cubo.	
	ABAJO							No se encuentra el cubo.	
ERRORMAX (cm)			3.5		3.7		2.5		
ERRORMIN (cm)			-3.4		-0.7		-1.7		

Tabla 46: Resultados de los cubos de poliestireno expandido.

Según la tabla 46, en el muro 2 se ubica los cubos colocados en su interior, pero, en el muro 4, en la mayor parte de escaneos, los cubos no son ubicados.

Como se apreció en el poliestireno de 5 x 5 x 30 cm, no siempre la reflexión de las ondas en los elementos colocados, llegan a los receptores del equipo.

🚧 POLIESTIRENO EXPANDIDO 15 x 5 x 5cm

w/c	CÓDIGO DE MURO	FRANJA	MURO TIPO 2 - POLIESTIRENO EXPANDIDO DE 15x5x5cm			COMENTARIO
			ERROR ESCANEADO HORIZONTAL (cm)	ERROR ESCANEADO EN EL RECUBRIMIENTO (cm)	ERROR ESCANEADO EN EL ANCHO DE VACÍO (cm)	
			A	A	A	
0.7	M2-A (derecha)	DERECHA4	-4.6	0.6	-9.1	No se encuentra 9.1 cm de poliestireno expandido (Parte final).
	M2-B (derecha)	DERECHA4	-1.8	1.3	-3.6	Se encuentra el poliestireno expandido.
	M4-A (derecha)	DERECHA4	0.2	0.6	0.3	Se encuentra el poliestireno expandido.
	M4-B (derecha)	DERECHA4	-1.1	0.4	-2.1	Se encuentra el poliestireno expandido.
	ERRORMAX (cm)		0.2	1.3	0.3	
	ERRORMIN (cm)		-4.6	0.4	-9.1	

(*) No se ha considerado M2,M4: ARRIBA, ABAJO ya que parte del espécimen se encuentra fuera del escaneo.

Tabla 47: Resultados del poliestireno expandido de 15x5x5cm.

En el caso de la tabla 47, en el escaneo M2-A-DERECHA4 se ha perdido 9.1 cm de la longitud del poliestireno expandido, lo que no sucede en los demás escaneos, que evidentemente los resultados son más favorables.

🚧 TUBO DE 2 PULGADAS DE DIÁMETRO

w/c	CÓDIGO DE MURO	FRANJA	MURO TIPO 3 - Tubo DE 2"			COMENTARIO
			ERROR ESCANEADO HORIZONTAL (cm)	ERROR ESCANEADO EN EL RECUBRIMIENTO (cm)	ERROR ESCANEADO EN EL ANCHO DE VACÍO (cm)	
			A	A	A	
0.6	M5-A (arriba)	ARRIBA1	2.3	2.4	-	Se encuentra el tubo de PVC de 2".
		ARRIBA2	2.3	1.9	-	Se encuentra el tubo de PVC de 2".
		ARRIBA3	0.6	1.5	-	Se encuentra el tubo de PVC de 2".
		ARRIBA4	2.6	-	-	Se encuentra el tubo de PVC de 2".
	M5-B (abajo)	ABAJO1				El tubo se encuentra fuera de la zona de escaneo.
		ABAJO2				El tubo se encuentra fuera de la zona de escaneo.
		ABAJO3				El tubo se encuentra fuera de la zona de escaneo.
		ABAJO4				El tubo se encuentra fuera de la zona de escaneo.
	M6-A (arriba)	ARRIBA1	0.2	0.1	-	Se encuentra el tubo de PVC de 2".
		ARRIBA2	0.2	0.0	-	Se encuentra el tubo de PVC de 2".
		ARRIBA3	0.5	1.1	-	Se encuentra el tubo de PVC de 2".
		ARRIBA4	0.2	-	-	Se encuentra el tubo de PVC de 2".
	M6-B (abajo)	ABAJO1	3.1	0.1	-	Se encuentra el tubo de PVC de 2".
		ABAJO2	3.0	-0.3	-	Se encuentra el tubo de PVC de 2".
		ABAJO3	2.7	0.0	-	Se encuentra el tubo de PVC de 2".
		ABAJO4	2.9	0.2	-	Se encuentra el tubo de PVC de 2".
	ERRORMAX (cm)		3.1	2.4	-	
	ERRORMIN (cm)		0.2	-0.3	-	

(*) En la mayoría de casos no se ha analizado el ancho del tubo de PVC (ARRIBA, ABAJO), ya que parte del espécimen se encuentra fuera del escaneo

Tabla 48: Resultados del tubo de PVC de 2".

Debido a sus dimensiones, el tubo de PVC de 2" es encontrado en todos los escaneos. Tener en cuenta que parte del tubo se encuentra fuera de la zona escaneada en el caso de analizarlo hacia abajo, sin embargo, a pesar de ello, es ubicable en el muro 6.

 TUBO DE 3 PULGADAS DE DIÁMETRO

w/c	CÓDIGO DE MURO	FRANJA	MURO TIPO 3 - Tubo DE 3"			COMENTARIO
			ERROR ESCANEADO HORIZONTAL (cm)	ERROR ESCANEADO EN EL RECUBRIMIENTO (cm)	ERROR ESCANEADO EN EL ANCHO DE VACÍO (cm)	
			A	A	A	
0.6	M5-A (arriba)	ARRIBA1	0.3	0.5	-0.2	Se encuentra el tubo de 3".
		ARRIBA2	0.0	1.0	0.6	Se encuentra el tubo de 3".
		ARRIBA3	0.3	1.3	-1.4	Se encuentra el tubo de 3".
		ARRIBA4	-0.4	2.2	-1.9	Se encuentra el tubo de 3".
	M5-B (abajo)	ABAJO1	-0.5	2.3	-1.3	Se encuentra el tubo de 3".
		ABAJO2	-0.1	1.1	-1.9	Se encuentra el tubo de 3".
		ABAJO3	0.1	1.0	-2.1	Se encuentra el tubo de 3".
		ABAJO4	-0.4	2.1	-1.8	Se encuentra el tubo de 3".
	M6-A (arriba)	ARRIBA1	-0.3	0.5	-1.5	Se encuentra el tubo de 3".
		ARRIBA2	-0.3	2.0	-2.3	Se encuentra el tubo de 3".
		ARRIBA3	-0.1	1.5	-2.4	Se encuentra el tubo de 3".
		ARRIBA4	-0.2	1.9	-2.7	Se encuentra el tubo de 3".
	M6-B (abajo)	ABAJO1	-0.3	0.5	-1.7	Se encuentra el tubo de 3".
		ABAJO2	0.1	1.8	-0.9	Se encuentra el tubo de 3".
		ABAJO3	0.0	1.8	-1.8	Se encuentra el tubo de 3".
		ABAJO4	-0.3	0.5	-0.8	Se encuentra el tubo de 3".
	ERRORMAX (cm)		0.3	2.3	0.6	
	ERRORMIN (cm)		-0.5	0.5	-2.7	

Tabla 49: Resultados del tubo de PVC de 3".

En la tabla 49 se muestra que este tubo de PVC es ubicado completamente.

 ACERO DE 1 PULGADA (fuera del límite escaneado)

Por otra parte, el acero, a pesar de que estuvo fuera de la zona escaneada en todos los casos, apareció en los resultados de la mayoría de los escaneos. No se tomarán en cuenta estos datos, ya que se encuentran fuera de la zona escaneada.

w/c	CÓDIGO DE MURO	FRANJA	MURO TIPO 3 - ACERO DE 1"			COMENTARIO
			ERROR ESCANEADO HORIZONTAL (cm)	ERROR ESCANEADO EN EL RECUBRIMIENTO (cm)	ERROR ESCANEADO EN EL ANCHO DE VACÍO (cm)	
			A	A	A	
0.6	M5-A (arriba)	ARRIBA1	5.0	-0.8	-	Se encuentra a pesar de estar fuera de la zona escaneada.
		ARRIBA2	5.0	-1.2	-	Se encuentra a pesar de estar fuera de la zona escaneada.
		ARRIBA3	5.0	1.6	-	Se encuentra a pesar de estar fuera de la zona escaneada.
		ARRIBA4	5.0	-0.7	-	Se encuentra a pesar de estar fuera de la zona escaneada.
	M5-B (abajo)	ABAJO1	-1.9	-0.8	-	Se encuentra a pesar de estar fuera de la zona escaneada.
		ABAJO2	-1.8	-0.6	-	Se encuentra a pesar de estar fuera de la zona escaneada.
		ABAJO3	-1.3	-0.7	-	Se encuentra a pesar de estar fuera de la zona escaneada.
		ABAJO4	-2.1	-0.8	-	Se encuentra a pesar de estar fuera de la zona escaneada.
	M6-A (arriba)	ARRIBA1				No se encuentra, ya que está fuera de la zona escaneada.
		ARRIBA2				No se encuentra, ya que está fuera de la zona escaneada.
		ARRIBA3				No se encuentra, ya que está fuera de la zona escaneada.
		ARRIBA4				No se encuentra, ya que está fuera de la zona escaneada.
	M6-B (abajo)	ABAJO1	-2.7	2.0	-	Se encuentra a pesar de estar fuera de la zona escaneada.
		ABAJO2	-2.1	1.7	-	Se encuentra a pesar de estar fuera de la zona escaneada.
		ABAJO3	-2.2	1.8	-	Se encuentra a pesar de estar fuera de la zona escaneada.
		ABAJO4	-1.9	2.0	-	Se encuentra a pesar de estar fuera de la zona escaneada.
	ERRORMAX (cm)		5.0	2.0	-	
	ERRORMIN (cm)		-2.7	-1.2	-	

(* En la mayoría de casos no se ha analizado el ancho del tubo de PVC (ARRIBA, ABAJO), ya que parte del espécimen se encuentra fuera del escaneo.

Tabla 50: Resultados del acero de 1”.

Por último, para los muros M5 y M6 con tuberías y acero, se ha escaneado en tres franjas directamente sobre los elementos colocados en toda su longitud (DERECHA1, 2, 3), con el fin de demostrar que los SCAN-B no son constantes en la longitud escaneada (Véase figura 70, 71 y 72).

➤ TUBO DE PVC DE 2 PULGADAS (DERECHA1)

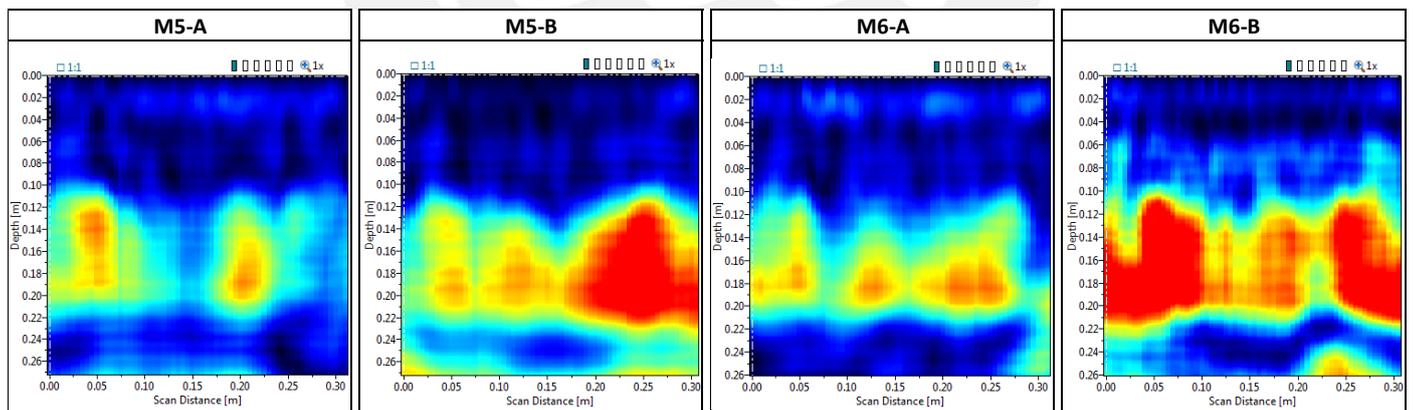


Figura 70: Escaneo longitudinal del tubo de PVC de 2”.

➤ TUBO DE PVC DE 3 PULGADAS (DERECHA2)

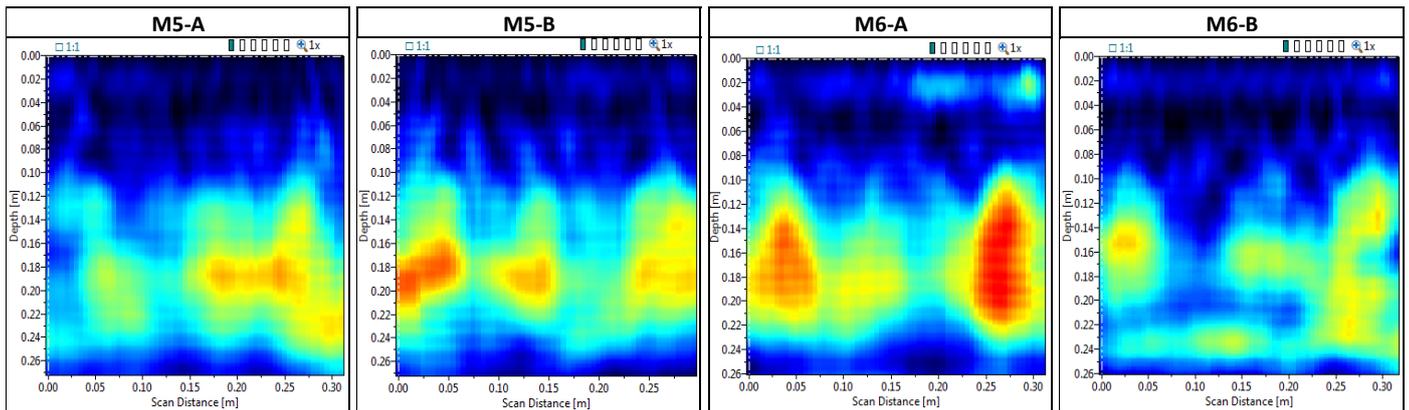


Figura 71: Escaneo longitudinal del tubo de PVC de 3”.

➤ ACERO DE 1 PULGADA (DERECHA3)

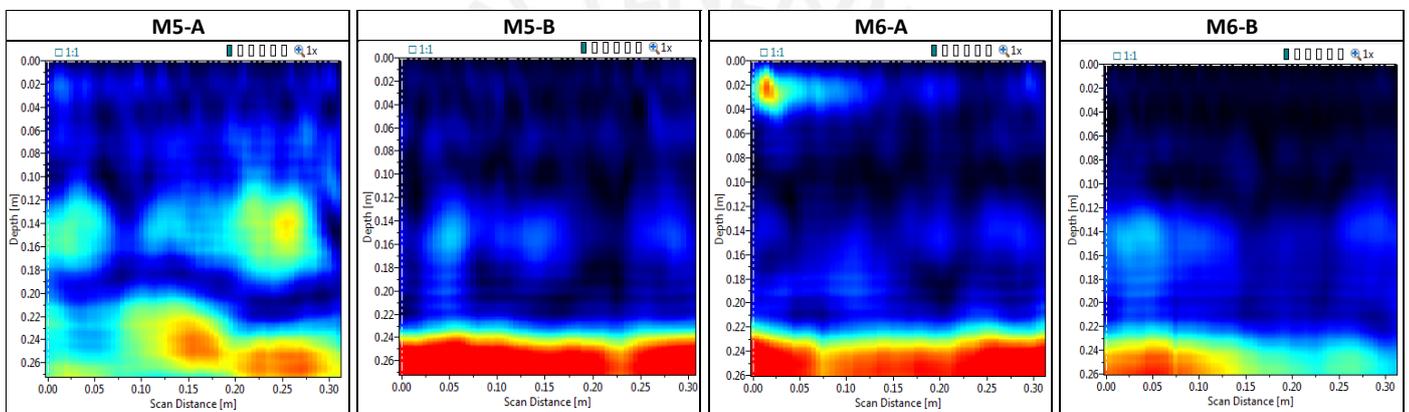


Figura 72: Escaneo longitudinal del acero de 1”.

Según las figuras 70 y 71, se aprecia que los tubos de PVC no poseen una gráfica constante. Como ya se mencionó, las ondas reflejadas no llegan con la misma intensidad en el receptor del equipo, además, estos materiales poseen forma circular.

Por otro lado, en la figura 72, y lo escaneado en la tabla 50, se verifica que los aceros también ejercen reflexión de las ondas. Tener en cuenta que estos resultados no tienen mucha reflexión de ondas que un vacío (por las impedancias), sin embargo, estos resultados pueden ser confundidos como vacíos.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

7.1.1. ONDAS LONGITUDINALES (ONDAS P)

- En el caso de las vigas, tabla 23, se consideró que una variación de la velocidad, mayor a 2% de la velocidad del concreto puro, sea tomada como una esfera encontrada; y con estos resultados, se obtuvo el grado de confiabilidad para encontrar vacíos de distinto tamaño (véase tabla 51).

ESCAÑEOS ONDAS P			
TAMAÑO DE VACÍOS (cm)	CANTIDAD DE ESFERAS ENCONTRADAS	CANTIDAD DE ESFERAS NO ENCONTRADAS	GRADO DE CONFIABILIDAD (%)
1.4	0	36	0.00
2.5	3	33	8.33
5	20	4	83.33

Tabla 51: Grado de confiabilidad al ubicar esferas de poliestireno expandido.

Como se aprecia en la tabla 51, se tiene un grado de confiabilidad de 0.00% al ubicar esferas de 1.4 cm y de 8.33% para esferas de 2.5 cm. A pesar que la mitad de la longitud de onda es de 3.75 cm para una velocidad de 4051 m/s (el promedio de las velocidades obtenidas en las vigas), esferas de 2.5cm fueron localizados aunque con dificultad. No necesariamente se pueden encontrar vacíos si estos son mayores a la mitad de la longitud de onda, sino que también vacíos de menor dimensión, pero estos con una muy baja probabilidad. Las esferas de 1.4cm son casi la sexta parte de la longitud de onda, es por ello que no fueron localizados.

Para el caso de esferas de 5cm, la confiabilidad de encontrar una esfera es de 83.33%, por lo que se deduce que hay una cierta probabilidad de no encontrar un vacío de esta dimensión. Tener en cuenta que los transductores se colocaron directamente sobre los elementos que simulan ser vacíos, caso contrario, la detección sería mucho menor.

También se aprecia que los cubos de poliestireno expandido de 5, 7 o 10cm son encontrados con mayor exactitud que los de menor tamaño (véase tabla 23, vaciado V14).

- Para el caso de los muros (tablas 32, 33 y 34), los materiales fueron ubicados según la tabla 52.

ESCAÑEOS ONDAS P			
TIPO DE MATERIALES	UBICADOS	NO UBICADOS	GRADO DE CONFIABILIDAD (%)
Poliestireno expandido (5x5x30cm)	6	0	100.00
Esferas de plástico (ϕ 7cm)	1	3	25.00
Botella de plástico (24cm x ϕ 5cm)	4	0	100.00
Envase de cartón (23cm x ϕ 7cm)	6	0	100.00
Cubos de poliestireno expandido (5cm)	2	4	33.33
Poliestireno expandido (5x5x15cm)	5	1	83.33
Tubo PVC (ϕ 2")	6	0	100.00
Tubo PVC (ϕ 3")	6	0	100.00
Acero (ϕ 1")	0	6	0.00

Tabla 52: Grado de confiabilidad al ubicar los materiales de los muros.

Tener en cuenta que no se tuvieron diversos resultados, como el caso de las vigas, por lo que el grado de confiabilidad es solo referencial.

Como se aprecia en la tabla 52, el acero no fue localizado debido a que es de solo 2.5 centímetros de diámetro. Materiales de mayores dimensiones, como son los tubos de PVC y el envase de cartón, fueron ubicados sin problemas.

7.1.2. ONDAS TRANSVERSALES (ONDAS S)

a. ZONA MUERTA Y CAMPO CERCANO

En ambos casos, vigas y muros, la zona muerta y el campo cercano tenían una dimensión parecida, por lo que se promedió las zonas halladas.

ZONA MUERTA				
MATERIAL	VIGAS (w/c = 0.7)	MUROS (w/c = 0.7)	MUROS (w/c = 0.6)	TOTAL
PROMEDIO (cm)	1.80	1.70	1.70	1.73
DESV. ESTANDAR (cm)	0.10	0.10	0.10	0.17
COEF. VARIACIÓN (%)	5.81	7.00	8.00	10.01

Tabla 53: Resumen de resultados de la zona muerta.

La zona muerta, según la tabla 53, posee un promedio de 1.73 centímetros con una desviación estándar de 0.17. Se aprecia que los valores no se encuentran alejados en especímenes con dimensiones de 15 y 25 cm; y relaciones agua cemento de 0.6 y 0.7.

Por otro lado, en el caso de la zona muerta más el campo cercano, tabla 54, se tiene un promedio de 3.56 centímetros, y una desviación estándar de 0.47.

ZONA MUERTA Y CAMPO CERCANO				
MATERIAL	VIGAS (w/c = 0.7)	MUROS (w/c = 0.7)	MUROS (w/c = 0.6)	TOTAL
PROMEDIO (cm)	3.79	3.40	3.50	3.56
DESV. ESTANDAR (cm)	0.21	0.30	0.30	0.47
COEF. VARIACIÓN (%)	5.65	7.50	7.50	7.53

Tabla 54: Resumen de resultados de la zona muerta más el campo cercano.

Como se aprecia en ambos casos, la zona muerta más campo cercano ha disminuido en los muros. Esto sucede debido a que las caras laterales de las vigas han producido cierta perturbación en los resultados.

PRESENCIA DE ZONA MUERTA Y CAMPO CERCANO (%)						
MATERIAL	VIGAS (w/c = 0.7)		MUROS (w/c = 0.7)		MUROS (w/c = 0.6)	
	CANTIDAD	(%)	CANTIDAD	(%)	CANTIDAD	(%)
CON PRESENCIA	192	78.37	33	61.11	29	63.04
SIN PRESENCIA	53	21.63	21	38.89	17	36.96
TOTAL	245	100	54	100	46	100

Tabla 55: Resumen de presencia de zona muerta y campo cercano.

Además, en la tabla 55, se aprecia que estas zonas pueden aparecer hasta un 78.37% en el caso de las vigas, que es mayor que el caso de los muros, 61.11%, para relaciones agua cemento 0.7, y 63.04% para 0.6. Como se comentó en el párrafo anterior, estas zonas se han incrementado en las vigas por efecto de las caras laterales.

Por ende, es mejor no fiarse de los resultados obtenidos en la zona muerta y campo cercano.

b. ESFERAS ENCONTRADAS EN LAS VIGAS

En la tabla 56, se detalla cuantas esferas colocadas fueron localizadas según su tamaño.

Se aprecia que hay un 11.11% de probabilidad de encontrar esferas de 1.4 cm de diámetro, 59.60% para esferas de 2.5 cm y 82.35% de encontrar esferas de 5 cm.

ESCANEOS ONDA S			
DIÁMETRO DE ESFERA DE POLIESTIRENO (cm)	ESFERAS ENCONTRADAS	ESFERAS NO ENCONTRADAS	GRADO DE CONFIABILIDAD (%)
1.4	22	176	11.11
2.5	118	80	59.60
5.0	112	24	82.35

Tabla 56: Grado de confiabilidad al ubicar las esferas – onda S.

c. ESCANEO DEL ESPESOR

En la tabla 57 se resumen los errores máximos encontrados en el escaneo del espesor.

MEDICION DE ESPESORES				
MATERIAL	VIGAS (w/c = 0.7)	MUROS (w/c = 0.7)	MUROS (w/c = 0.6)	ERROR MAX
ERROR MÁXIMO (%)	7.89	2.00	0.00	12.99
ERROR MÍNIMO (%)	-12.99	-8.80	-12.75	

Tabla 57: Resumen del error máximo al escanear espesores.

Se deduce que en especímenes entre 15 y 25 centímetros de espesor, se puede encontrar dicha dimensión con un error máximo de 12.99%, al usar un equipo de pulso eco.

d. UBICACIÓN DE VACÍOS

- En el caso de las vigas, en modo horizontal, se ha podido encontrar esferas de 1.4, 2.5 y 5 centímetros con un error máximo de 4.3 centímetros. No es un error considerable, por lo que es posible utilizarlo para escanear vacíos en edificaciones de concreto simple. Sin embargo, al analizar el recubrimiento se obtuvo un error máximo de 7.7 centímetros, el cual es excesivo en una viga de 15 centímetros. Por ende, en el caso de que el ancho del espécimen sea menor a dos veces su espesor, es posible encontrar vacíos horizontalmente, con un error de 4.3 centímetros como máximo; sin embargo, la profundidad en que se encuentren estos vacíos no es confiable. Además, para una velocidad de onda S de 2100m/s, la mitad de la longitud de onda es de 2.1 centímetros, es por ello que se pudieron ubicar las esferas de 2.5 centímetros

con una precisión de 59.60%, y de 5 centímetros con una precisión de 82.35%.

También, tener en cuenta que es posible encontrar vacíos menores a la mitad de la longitud de onda (con ondas S), pero con muy baja probabilidad, como fue el caso de las esferas de 1.4 centímetros, que a pesar de ser menores a la mitad de la longitud de onda, se les pudo encontrar con una precisión de 10.19%. Esto se debe ya que la onda puede reflejar en estas simulaciones de vacíos, pero no siempre, ya que parte la energía de la onda tiende a la difracción o refracción.

- Por otro lado, en el caso de los muros, se ve que a pesar que los materiales sean de forma cuadrada y no circular, parte de su longitud no es encontrada, ya que las ondas no llegan con la misma intensidad en el receptor en cada punto de medición. Es por ello que se distingue que en el caso del envase de cartón y los tubos de PVC, los resultados son más visibles ya que tienen una mayor longitud de localización, lo cual no es favorable para los cubos o esferas de menor dimensión.
- El caso de las tuberías de PVC, estas son ubicables completamente con un error máximo de 3.1 centímetros en escaneo horizontal y 2.4 centímetros en profundidad. En cambio en el acero, a pesar de que este está fuera del área escaneada, es ubicado por el pulso eco, por lo que se infiere que aceros mayores a 1" de diámetro son detectables con una frecuencia de 50Khz.

Por último, en los escaneos longitudinales de las tuberías y acero (véase figura 70, 71 y 72), se aprecia que la gráfica escaneada no es uniforme, es decir, afirma el hecho de que el equipo puede ubicar o no vacíos dentro del concreto, y que la llegada de la intensidad de las ondas al receptor es variable en cada punto escaneado.

- A pesar que un vacío tenga mayor dimensión que la mitad de la longitud de la onda, no hay una total seguridad de encontrar un vacío. Como se dio en el escaneo con ondas P, de las esferas de 5 cm en las vigas, un 83.33% de estas fue encontrada, no necesariamente todas; también con el escaneo con ondas S, se tiene una confiabilidad de 82.35% para ubicar una esfera de 5 cm. Tener en cuenta que las ondas S pueden encontrar vacíos más pequeños, ya que su velocidad es aproximadamente la mitad de la de onda P, es decir, su longitud de onda es menor.

De las hipótesis dadas inicialmente, se cumplieron las siguientes:

- a. La velocidad si disminuye al encontrarse con un material diferente, en el caso de vigas y muros, se tomó como encontrado un vacío cuando la velocidad de ultrasonido disminuía un 2% de la velocidad en el mismo material sin vacíos. El 2% se definió según la norma ASTM C597, ya que el error máximo que se puede obtener en un punto, al realizar un escaneo en un material uniforme como el concreto, es menor al 2%.
- b. La precisión del pulso eco al analizar espesores no es del 10%, sino es de 12.99%, en caso de elementos de concreto de 15 y 25 centímetros.
- c. No se detectaron los vacíos simulados que se encontraban cerca de la superficie, debido a la zona muerta o el campo cercano. En otras palabras, no se puede encontrar imperfecciones en los primeros 3.8 centímetros.
- d. Las esferas de 1.4 centímetros fueron detectados con un grado de confiabilidad de 0.00%, con ondas P de 54 KHz; y 10,19% con ondas S de 50 KHz. Debido a que estos elementos son de menor dimensión que la mitad de la longitud de onda, es casi improbable de ubicarlos.

7.1.3. CORRELACIÓN ENTRE ONDA P Y S

A pesar de que a más densidad la velocidad de onda es mayor, al parecer no se diferencia en relaciones agua cemento 0.6 y 0.7 de lo fabricado (véase tabla 58). Tener en cuenta que no se tuvo una cantidad suficiente de muros para tener una comparación confiable.

VELOCIDAD DE ONDA S (m/s)	
VIGAS (w/c = 0.7)	2232
MUROS (w/c = 0.7)	2177
MUROS (w/c = 0.6)	2165

Tabla 58: Resumen de velocidades promedio (ondas S).

Por otra parte, se encuentra una correlación de la onda S con la onda P, en los resultados de las vigas y los muros (véase tabla 59, 60 y 61).

MEZCLA	Resistencia (kg/cm ²)	velocidad onda P (m/s)	velocidad onda S (m/s)	COEF. ONDA S/P
V1	289.02	4096	2265	0.55
V2	294.87	4116	2303	0.56
V3	284.09	3922	2198	0.56
V4	293.31	4120	2264	0.55
V6	258.22	4099	2207	0.54
V7	262.78	3969	2194	0.55
V8	267.85	3982	2203	0.55
V9	258.68	4061	2209	0.54
V10	267.62	3991	2256	0.57
V11	259.71	4019	2210	0.55
V12	287.94	4131	2241	0.54
V13	281.68	4109	2236	0.54
PROMEDIO				0.55
DESV. ESTANDAR				0.01

Tabla 59: Correlación entre onda S y onda P – vigas.

Agua/Cemento (w/c)	MURO	Resistencia (kg/cm ²)	velocidad onda P (m/s)	velocidad onda S (m/s)	COEF. ONDA S/P
0.7	M1	298.9	4237	2250	0.53
	M2	284.8	4153	2107	0.51
	M4	327.0	4181	2175	0.52
PROMEDIO					0.52
DESV. ESTANDAR					0.01

Tabla 60: Correlación entre onda S y onda P – muros w/c=0.7.

Agua/Cemento (w/c)	MURO	Resistencia (kg/cm ²)	velocidad onda P (m/s)	velocidad onda S (m/s)	COEF. ONDA S/P
0.6	M3	360.2	4292	2232	0.52
	M5	372.9	4267	2179	0.51
	M6	339.2	4263	2085	0.49
PROMEDIO					0.51
DESV. ESTANDAR					0.02

Tabla 61: Correlación entre onda S y onda P – muros w/c=0.6.

Según Krautkramer and Krautkramer (1990), con esta relación se puede hallar el módulo de poisson, con la siguiente fórmula:

$$Coef\ onda\ \frac{S}{P} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 + 2\nu)}}$$

Por lo que para un coeficiente de 0.55, en las vigas, se tiene un módulo de Poisson de 0.28; y para los muros, con un coeficiente de 0.51 o 0.52, se tiene un módulo de Poisson de 0.32.

Tener en cuenta que esta fórmula solo se ha probado para materiales homogéneos por Krautkramer, por lo que según los resultados obtenidos, no es posible utilizar esta fórmula para materiales heterogéneos como el concreto.

7.1.4. FUENTES DE ERROR

Para el caso de escaneos con el equipo de ultrasonido ondas P, las principales fuentes de error fueron las siguientes:

- La humedad natural en cada espécimen de concreto.
- El detectar vacíos, fisuras, cangrejas internas, entre otros, depende demasiado de la experiencia del operador. El colocar alineadamente el transductor emisor con el receptor, la cantidad de acoplante, la cantidad de repeticiones en el mismo punto y el ajuste adecuado del voltaje y la ganancia en cada medición, influyen en los resultados.

Por otro lado, para el caso de escaneos con el equipo de pulso eco ondas S, las fuentes de error fueron las siguientes:

- El detectar vacíos, fisuras, cangrejas internas, entre otros, depende bastante de la experiencia del operador. El ajuste adecuado del voltaje y la ganancia, la elección de la velocidad a utilizar en cada escaneo, el ubicar el equipo en el punto adecuado para la toma de cada medición, y el ajuste en la ganancia de colores.
- La distancia entre la toma de datos, mientras mayor sea esta dimensión, menor probabilidad de ubicar vacíos pequeños.
- La compensación horizontal, mientras más alejada de las caras laterales, mejor será la precisión del equipo en la ubicación de vacíos.
- Las dimensiones del espécimen a analizar.
- La rugosidad y desnivel de los especímenes escaneados.
- La precisión del equipo es de 0.1 centímetros.

7.2. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos, se ha llegado a una metodología experimental en la localización de vacíos en el concreto, en el cual se recomienda lo siguiente:

- El uso del pulso eco es recomendable para elementos de concreto cuya longitud y ancho de la cara en análisis sea por lo menos el doble del espesor, caso contrario, no se podrá ubicar la profundidad de discontinuidades, aunque sí la ubicación donde se encuentre en el área escaneada. Considerar que vacíos de menor tamaño que la mitad de la longitud de la onda, no son detectables con una buena precisión.
- Tener en cuenta que la zona muerta y campo cercano, a pesar de estar alejado de las caras transversales aparece en los escaneos; por lo que cualquier resultado que aparezca en los primeros 4 centímetros del scan-B, debe ser descartado o analizado minuciosamente.
- En caso de concreto armado, es recomendable que el elemento sea escaneado anteriormente por un profómetro para la ubicación de los aceros en el material. Tener en cuenta que el acero también es localizado.
- Al utilizar el equipo de pulso eco para buscar concavidades dentro del concreto, cuan menor sea la distancia entre mediciones, se tendrá más datos y mejor será la precisión al ubicar imperfecciones (se recomienda que en casos de laboratorio se utilice una distancia de 0.5 o 1 centímetro, y en caso de obra, distancias de 2.5 centímetros). Es mejor observar la pantalla mientras se va graficando el scan-B a tiempo real. Ni bien se encuentre una variación en el tiempo de llegada de la onda, pausar el escaneo y retroceder por lo menos 3 mediciones, y verificar si la variación en el tiempo de llegada de la onda, sucede nuevamente.
- En el caso de que se pueda acceder a la cara posterior del análisis, una vez encontrado una imperfección con el equipo pulso eco, utilizar el equipo de ultrasonido de ondas P y escanear un diámetro de 4 centímetros, con el fin de constatar la supuesta imperfección. Es preferible utilizar un transductor de mayor frecuencia, ya que la velocidad de la onda P suele ser el doble de la onda S. En caso que no se pueda acceder a la cara posterior, se podría utilizar un solo transductor pulso eco de onda S, de la misma frecuencia que el pulso eco utilizado, para así constatar dicho defecto.

El equipo de pulso eco puede ser utilizado en el área de calidad y supervisión de estructuras. También el pulso eco puede ser utilizado para medir el espesor y/o localizar discontinuidades en asfalto, estructuras antiguas de concreto simple, shotcrete (sin armadura), veredas, losas (sin armadura), silos de concreto, subzapatas, sobrecimientos, presas de concreto, entre otros.

Asimismo, evaluar el estado de cables pretensado, ya que estos pierden adherencia con el concreto o se corroen en el tiempo.

7.3. PROYECCIONES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Con el fin de optimizar esta metodología, se espera que futuras investigaciones complementen y ayuden a mejorar la precisión y la confiabilidad de los resultados obtenidos. Mientras más confiables sean los resultados, estos métodos disminuirán la cantidad de ensayos destructivos que se necesiten realizar en una estructura, y de este modo disminuir costos y daños en el concreto.

A continuación se presentan una serie de propuestas para colaborar con el avance y desarrollo de ensayos no destructivos en el concreto:

- Escaneo en especímenes de concreto de mayor tamaño, como por ejemplo especímenes de 20 x 40 x 40 cm o 30 x 60 x 60 cm, los cuales posean vacíos de 3, 4, 6 o más centímetros de diámetro.
- Uso de transductores de diferente frecuencia para ubicar vacíos.
- Correlación de las velocidades onda P y S con el módulo de Poisson del concreto.
- Evaluación de cangrejeras internas en estructuras de concreto armado.
- Estudios de la velocidad de onda P en concreto con diferentes porcentajes de aire incorporado.
- Espesor del concreto dañado por incendios o debido a altas temperaturas.
- Estudios en concretos porosos.
- Localización de vacíos y medición de espesores en asfalto.

También, el de utilizar otros métodos no destructivos en la localización de vacíos y/o medición de espesores, como por ejemplo: impacto eco, geo radar (GPR), radiometría, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

ALCAÑIZ MARTINEZ, Jesús H. (2011). “Chequeo de estructuras de Hormigón Armado: Análisis de la relación de resultados de probetas testigos y ultrasonidos”. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. España.

AMERICAN CONCRETE INTITUTE. 228.1R-03 In-place Methods to Estimate Concrete Strength.

AMERICAN CONCRETE INTITUTE. 228.2R-98 Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures.

B. GRAFE, M. KRAUSE, F. MIELENTZ y otros (2009). “Ultrasonic Imaging of post-tensioned concrete elements: New techniques for reliable localization of grouting defects”. Berlín Germany.

BLAKE, Roy. “Sistemas electrónicos de comunicaciones”, Apéndice A. Cengage Learning Editores.

BLANCO ALVAREZ, Francisco. “Propiedades acústicas”. Capítulo 2.Fecha de consulta:08/01/2014. <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Temall.2.4.ACUSTICAS.pdf>

CARINO, N.J. “Handbook on nondestructive testing of concrete / edited by V.M. Malhotra and N.J. Carino”. Boca Raton, FL : CRC ; ASTM, 2004.

CÉSPEDES GARCÍA, Marco Antonio (2003). “Resistencia a la comprensión del concreto a partir de la velocidad de pulsos de ultrasonido”. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil. Universidad de Piura. 2003.

CUAUTILÁN IZCALLI (2010). “La prueba del ultrasonido”. Proyecto PAPIME CLAVE: PE101110.Laboratorio de tecnología de Materiales. Universidad Nacional de México.

FERNÁNDEZ HATRE, Alfonso. “Ensayos no destructivos por ultrasonido”. Manual básico de ensayos no destructivos. Principado de Asturias. Instituto de Fomento Regional.

GONZÁLES AYALA, Vicente y Enrique VARGAS. “Plataforma experimental para inspección de mortero con ultrasonido”. Laboratorio de Electrónica Digital. Asunción. Paraguay.

GUERRERO PÉREZ, Yader Alfonso y Breno SALGADO BARRA (2010). “Uso del ultrasonido para la evaluación de la homogeneidad en la densidad de especímenes de prueba trapezoidales de concreto asfáltico”. Infraestructura Vial Vol. 13 (#24). Universidad Federal de Santa Catarina. Brazil.

HERNÁNDEZ RAMOS, Jaime y Josué GARCÍA NAVARRO. Inspección por ultrasonido. Fecha de consulta: 14/05/2014.<<http://www.monografias.com/trabajos60/inspeccion-ultrasonido-materiales/inspeccion-ultrasonido-materiales2.shtml>>

HERNÁNDEZ, Ricardo. “Bases físicas ecografía modo B”. Archivo de Power Point. Porto, 23 de Septiembre de 2010. @2010 mindray confidential. <<http://www.sermef.es/html/documentos/basesfisicasecografiausmindray.pdf>>

JIAN-HUA, Tong y CHIN-LUNG, Chiu. “Multi-directional SAFT Method for Detecting the Defect inside Concrete Structures”. Department of computer science. HungKung University. Taiwan.

KRAUTKRÄMER, J., AND KRAUTKRÄMER, H. (1990). Ultrasonic Testing of Materials, 4th Edition, Springer-Verlag, New York.

LONG, Robert. The improvement of ultrasonic apparatus for the routine inspection of concrete. Thesis submitted to the University of London for the degree of Doctor of Philosophy. Department of mechanical engineering. 2000.

M. ANTONIO, Oscar V. y Hirose SOHICHI (2009). “Ultrasonic Imaging of Concrete by Syntethic Aperture Focusing Technique Based on Hilbert Huang Transform of time Domain Data”. Institute of Civil Engineering, University of the Philippines.

NORMA ASTM C597-09. Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete.

NORMA ASTM C138-14. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield and Air Content (Gravimetric) of concrete.

NORMA ASTM C143-15. Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete.

NORMA ASTM C192-14. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.

NORMA ASTM E1901-13. Standard Guide for Detection and Evaluation of Discontinuities by Contact Pulse-Echo Straight-Beam Ultrasonic Methods.

NORMA TÉCNICA PERUANA NTP 400.012 AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global. Fecha de consulta: 03/03/2015.

NORMA TÉCNICA PERUANA NTP 400.017 AGREGADOS. Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado. Fecha de consulta: 03/03/2015.

NORMA TÉCNICA PERUANA NTP 400.021 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción del agregado grueso. Fecha de consulta: 03/03/2015.

NORMA TÉCNICA PERUANA NTP 339.185 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado. Fecha de consulta: 03/03/2015.

NORMA TÉCNICA PERUANA NTP 400.037 AGREGADOS. Especificaciones normalizadas para agregados en hormigón (concreto). Fecha de consulta: 03/03/2015.

NORMA TÉCNICA PERUANA NTP 339.183 HORMIGÓN (CONCRETO). Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de hormigón (concreto) en el laboratorio. Fecha de consulta: 03/03/2015.

NORMA TÉCNICA PERUANA NTP 334.088 CEMENTOS. Aditivos químicos en pastas, morteros y hormigón (concreto). Fecha de consulta: 03/03/2015.

PASQUEL CARBAJAL, Enrique. Tópicos de tecnología del concreto. Segunda edición. 1952-1996. 380 páginas.

PELLICER LLOPIS, Vicente. Ensayos no destructivos en hormigón. Georadar y ultrasonidos. Proyecto de fin de grado. Universidad Politécnica de Valencia.

PROCEQ PUNDIT PL200-PE. “Manual de operación”. Fecha de consulta: 05/04/15. <http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/products/Concrete/PL-200/Spanish/Pundit_PL-200PE_Operating_Instructions_Spanish_low.pdf>

RIMOLDI, Claudio y Luis MUNDO. “Ensayos no destructivos por método de ultrasonido”. Cátedra de ensayos no destructivos. Departamento de Aeronáutica. Argentina. Fecha de consulta: 20/06/2014.
<<http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Apunte%20Ultrasonido%202012.pdf>>

SOLIS CARCAÑO, Rómel G, IVAN MORENO, Erick y William CASTILLO. “Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad del pulso ultrasónico y un índice de la calidad de los agregados”. 2004.

URREGO, José Alejandro. “Velocidad del sonido”. Fecha de consulta: 15/05/14. <[Http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujodegases/velocidaddelsonido/velocidadsonido.html](http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujodegases/velocidaddelsonido/velocidadsonido.html)>

VALENCIA ELGUERA, Gabriela. IBARRA NAVARRO, Miguel. “Estudio experimental para determinar patrones de correlación entre la resistencia a compresión y la velocidad de pulso ultrasónico en concreto simple”. Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. 2013.