UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES

EVALUACIÓN DE MATERIALES CEMENTICIOS
UTILIZANDO TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA EN
TRANSMISIÓN

TESIS DOCTORAL

DALMAY LLUVERAS NUÑEZ
INGENIERA EN AUTOMÁTICA

2017

**DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA Y
FABRICACIÓN**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES**

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN DE MATERIALES CEMENTICIOS
UTILIZANDO TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA EN
TRANSMISIÓN**

Autora: Dña. Dalmay Lluveras Nuñez

Ingeniera en Automática

Director: D. Miguel Ángel García Izquierdo

Dr. Ingeniero de Telecomunicación

Director: D. Miguel Ángel Molero Armenta

Dr. Ingeniero de Telecomunicación

2017

Tesis Doctoral

EVALUACIÓN DE MATERIALES CEMENTICIOS UTILIZANDO TOMOGRAFÍA
ULTRASÓNICA EN TRANSMISIÓN

Autora: Dña. Dalmay Lluveras Nuñez

Directores: D. Miguel Ángel García Izquierdo
D. Miguel Ángel Molero Armenta

Tribunal nombrado por el Mgfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid el día 20 de Junio de 2017.

Presidente: D. José Javier Anaya Velayos

Secretario: D. Guillermo de Arcas Castro

Vocal: Dña. Aparicio Secanellas

Vocal: Dña. Montserrat Acebes Pascual

Vocal: D. José Vicente Fuente Ramírez

Realizado el acto de defensa y lectura de Tesis el día _____ de 2017, en la E.T.S.I. de Ingenieros Industriales, Madrid.

Calificación: _____

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Agradecimientos

Esta es quizás la página más difícil de llenar en esta tesis. Son varios años dedicados a este proyecto, muchas las personas que de una forma u otra han formado parte de él. Primero agradecerle a Dios por ser su niña malcriada y guiar mis pasos hacia este país que me abrió sus puertas y en especial a todos los que han sido y son miembros del grupo G-CARMA.

A mis directores de tesis: Dr. Miguel Ángel García, gracias por la confianza depositada, toda la implicación y tiempo dedicado, preocupación e infinita ayuda; y al Dr. Miguel Ángel Molero Armenta, gracias por sus conocimientos, experiencia y esos meses de estancia en el DF, donde adquirí una nueva familia mexicana.

Al Dr. José Javier Anaya por su ayuda constante, dedicación, sabiduría y gran paciencia, sin las cuales este trabajo no hubiese tenido fin.

A la Dra. Margarita González por saber escuchar y todos sus consejos, tanto en el ámbito profesional como personal, siempre ha sido un gran apoyo.

A la Dra. Sofía Aparicio, por su disposición siempre de ayuda, colaboración con el inglés y generosidad.

Al Consejo Superior de Investigaciones Científicas por la concesión de la beca JAE-Pre Doctoral y a la Universidad Politécnica de Madrid por la concesión de la beca UPM-Santander.

A todo ese equipo maravillo de “Arganda” y posteriormente “Serrano”, que puedo llamar amigos, compartiendo desde las tortillas de Goyo hasta cumpleaños y viajes. Han hecho que me sintiera como en casa desde el primer día. Jesús gracias por las “botellas” en tu coche cada día desde el Instituto hasta Conde de Casal. Chicos muchas gracias de todo corazón e incluyo a toda “Roberta” así sé que ninguno se queda fuera.

A las amigas y amigos de siempre, aun desde la distancia siempre he sentido el apoyo, confianza y la energía que me enviaban. A ver como redacto estas líneas sin provocar celos!!! Irene, Yanet, Dalkis, Yusimit, Yadira, Niurka, Chicha, Hilda, Jairon, Alain,

siempre les he dicho que el amor se demuestra, pero acá ya lo tendrán también por escrito, “los quiero mucho”.

Al CDR madrileño en pleno, por todos los buenos momentos que hemos pasado, como cumpleaños colectivos, actividades y tertulias que espero sigan así por mucho tiempo.

Si he llegado hasta aquí, y hoy soy quien soy, es fruto del apoyo incondicional, cariño y confianza de mi maravillosa familia. Tía, primas, hermano, cuñada, sobrinos, y de los que no están (pero sé que guían mis pasos desde el cielo), gracias por siempre estar conmigo a pesar de la distancia.

A ustedes, mamá y papá, son mi ejemplo a seguir. No existen palabras que puedan expresar el inmenso amor, y gratitud que siento. Son mi fuerza, y mi mayor orgullo. Gracias.

A Ramón por su amor, y todos estos años que ha compartido conmigo.

Resumen

El uso de la imagen ultrasónica para evaluar estructuras y materiales cementicios va en aumento a la vez que la capacidad de inspección, procesamiento y almacenamiento de la información. Entre las múltiples representaciones y formas de generar esa imagen, en esta tesis se ha optado por estudiar la capacidad de la imagen generada mediante tomografía ultrasónica en transmisión basadas en medidas de atenuación y velocidad para localizar, detectar y estimar los materiales más comunes embebidos en hormigón, como pueden ser refuerzos o huecos, tanto naturales como artificiales.

El hormigón es un material heterogéneo, esto hace que las ondas ultrasónicas tengan una propagación compleja, en la que diferentes fenómenos físicos, como la reflexión, la difracción, la dispersión y la conversión de modo interactúan de tal manera que pueden enmascarar la información relevante sobre las estructuras embebidas. Se han realizado simulaciones numéricas donde se estudia este fenómeno. Asimismo, se han fabricado un conjunto de probetas de hormigón a las que se les han embebido barras cilíndricas y tubos de diferentes materiales y tamaños, cubriendo un amplio rango de impedancias acústicas que son representativas de los materiales más comunes encontrados en el hormigón.

Las señales ultrasónicas experimentales se han obtenido mediante la utilización de un sistema portátil de inspección tomográfica, que tiene como ventaja necesitar únicamente dos transductores ultrasónicos para realizar las inspecciones. Este sistema es una de las aportaciones de esta tesis.

Finalmente, las posiciones y los diámetros de las inclusiones han sido detectados y estimados utilizando técnicas de segmentación de imágenes tomográficas. La precisión de estas mediciones depende de la diferencia de impedancias acústicas entre el hormigón y el material embebido así como del diámetro de las inclusiones.

Palabras claves: Ultrasonidos, imágenes tomográficas, hormigón

Abstract

The use of ultrasonic imaging to evaluate cementitious structures and materials is increasing as well as the ability to inspect, process and store information. Among the many representations and ways to generate this image, in this thesis the performance of ultrasonic transmission imaging to locate, detect and estimate the most common materials embedded in concrete, such as reinforcements or voids, both natural and artificial, is studied. These ultrasonic images are based on attenuation and speed measurements.

Concrete is a heterogeneous material, which causes the ultrasonic waves to have a complex propagation, in which different physical phenomena, such as reflection, diffraction, dispersion and mode conversion interact in such a way that they can mask relevant information about embedded structures. Numerical simulations have been carried out to study this phenomenon. In addition, a set of concrete specimens has been manufactured in which cylindrical bars and pipes of different materials and sizes have been embedded, covering a wide range of acoustic impedances representative of the most common materials found in concrete.

The experimental ultrasonic signals have been obtained using a portable tomographic inspection system, which has the advantage of needing only two ultrasonic transducers to carry out the inspections. This system is one of the contributions of this thesis.

Finally, the positions and diameters of the inclusions have been detected and estimated using tomographic image segmentation techniques. The accuracy of these measurements depends on the difference in acoustic impedances between the concrete and the embedded material, as well as, the diameter of the inclusions.

Keywords: Ultrasound, tomographic images, concrete

Índice general

1. Introducción y estado del arte	1
1.1. Introducción	1
1.2. Técnicas de evaluación por ultrasonidos	3
1.3. Estado del arte de la tomografía ultrasónica en transmisión aplicada a materiales cementicios	6
1.4. Objetivos y estructura de la tesis	8
2. Fundamentos de la tomografía ultrasónica de transmisión.....	11
2.1. Principios básicos de las señales ultrasónicas.....	11
2.2. La imagen ultrasónica	15
2.3. Métodos de reconstrucción tomográfica	18
2.3.1. Métodos de reconstrucción analíticos.....	20
2.3.2. Métodos de reconstrucción algebraicos.....	22
2.4. Tomografía ultrasónica de transmisión.....	28
2.5. Resumen del capítulo	30
3. Simulaciones numéricas	31
3.1. El simulador de propagación de ondas ultrasónicas SimNDT	31
3.1.1. Descripción general del simulador	32
3.1.2. Validación del simulador.....	34
3.1.3. Propagación de ondas	39
3.2. De las señales simuladas al sinograma	47
3.2.1. Ángulo ciego	48
3.2.2. Cálculo de los sinogramas	49
3.2.3. Estimación del instante de llegada.....	51
3.2.4. Sinogramas	52
3.3. Sintonización de parámetros en los métodos de reconstrucción algebraica	53
3.3.1. Anchura del haz	55

3.3.2.	Número de posiciones del trasmisor.....	56
3.3.3.	Número de posiciones del receptor	57
3.3.4.	Variación del ángulo ciego	58
3.4.	Resumen del capítulo	59
4.	Diseño experimental	61
4.1.	Sistema de tomografía ultrasónica para probetas con simetría cilíndrica IMAUSHOR	61
4.1.1.	Descripción general del tomógrafo.....	62
4.1.2.	Sistema de inspección.....	63
4.1.3.	Sistema de generación de la imagen ultrasónica	66
4.2.	Diseño de las probetas	70
4.3.	Procedimiento y parámetros de las inspecciones.....	75
4.4.	Resumen del capítulo	78
5.	Análisis de los resultados.....	79
5.1.	Resultados de las inspecciones	80
5.1.1.	Resultados de las inspecciones radiales.	80
5.1.2.	Resultados de las inspecciones tomográficas.....	83
5.2.	Estudio cuantitativo de las reconstrucciones	91
5.3.	Estudio de los parámetros del tomógrafo	95
5.3.1.	Variación del número de receptores.....	96
5.3.2.	Variación del número de emisores	98
5.4.	Reconstrucciones tridimensionales de las probetas	100
5.5.	Estudio de los errores de reconstrucción	102
5.6.	Resumen del capítulo	104
6.	Conclusiones y líneas futuras de investigación	107
6.1.	Conclusiones.....	107
6.2.	Líneas futuras.....	109
	Bibliografía	111

Índice de figuras

Figura 2.1 Atenuación.	15
Figura 2.2 Técnica de inspección pulso-eco.....	15
Figura 2.3 Técnica de inspección por transmisión	16
Figura 2.4 Imágenes ultrasónicas a) A-Scan, b) B-Scan y c) C-Scan y D-Scan.	17
Figura 2.5 Obtención de la imagen tomográfica	18
Figura 2.6 Tomografía en transmisión utilizando rayos paralelos	19
Figura 2.7 Fundamentos de los métodos algebraicos	22
Figura 2.8 Definición de peso.....	23
Figura 2.9 Solución iterativa cuando el número de ecuaciones es igual al número de incógnitas.....	26
Figura 2.10 Solución iterativa cuando el número de ecuaciones es mayor que al número de incógnitas	26
Figura 3.1 Comparación entre los datos simulados y experimentales.....	34
Figura 3.2 Imágenes de la probeta de aluminio sin y con agujeros simulada y real.	35
Figura 3.3 Imágenes diametrales en probeta de aluminio a) señales simuladas b) señales reales.....	35
Figura 3.4 Imágenes de la probeta de hormigón simuladas a) microestructura con tubos de PVC, b) con barras de aluminio, c) con barras de acero y d) probetas reales fabricadas.....	36
Figura 3.5 Imágenes radiales de la probeta de hormigón con tubos de PVC: a, b, c) simulación y d, e, f) señales reales obtenida con el sistema de tomografía.....	37
Figura 3.6 Imágenes radiales de la probeta de hormigón con defecto aluminio: a, b, c) simulación y d, e, f) señales reales obtenida con el sistema de tomografía.....	38
Figura 3.7 Imágenes radiales probeta de hormigón con barras de acero: a, b, c) simulación y d, e, f) señales reales obtenida con el sistema de tomografía.....	39
Figura 3.9 Diferentes instantes en simulación para una probeta de aluminio a) sin agujero, b) con un agujero relleno con agua, c) con un agujero relleno con aire.	41
Figura 3.10 Diferentes instantes en simulación de la propagación de la onda ultrasónica en a) piedra caliza sin inclusión y b) piedra caliza con inclusión acero	42
Figura 3.11 Simulación de la propagación de una onda ultrasónica en hormigón a diferentes instantes de tiempo con diferentes agujeros a) agua y b) aire	43
Figura 3.12 Parámetros utilizados en la inspección	45
Figura 3.13 Instantáneas de la propagación de las ondas ultrasónicas	45
Figura 3.14 Ejemplo de proyecciones cuando emiten cada uno de los transductores....	46
Figura 3.15 Ejemplo de imagen B-scan.....	47
Figura 3.16 a) Sin restricción y b) Con ángulo ciego de 75°	48
Figura 3.17 Cálculo de la distancia entre el transmisor y el receptor.....	50
Figura 3.18 Cálculo de la muestra de llegada na	51
Figura 3.19 Ejemplos de sinogramas de velocidades y de amplitudes.....	52
Figura 3.20 Diagrama de bloques.....	53
Figura 3.21 Imágenes test utilizadas.....	54
Figura 3.22 Error cuadrático medio con respecto a la anchura del haz.....	55
Figura 3.23 Error máximo con respecto a la anchura del haz	55

Figura 3.25 Error máximo respecto al número de medidas del transmisor.....	57
Figura 3.27 Error máximo respecto al número de medidas del receptor.....	58
Figura 3.28 Error cuadrático medio con respecto al ángulo ciego	59
Figura 3.29 Error máximo con respecto al ángulo ciego.....	59
Figura 4.1 Esquema del sistema tomográfico desarrollado.....	62
Figura 4.2 Subestructura 1 del subsistema de barrido mecánico.....	63
Figura 4.3 Subestructura 2 del subsistema de barrido mecánico.....	64
Figura 4.4 Emisión - recepción de un pulso electrónico en forma de haz.....	65
Figura 4.5 Diagrama de bloques del subsistema electrónico.....	66
Figura 4.6 Transductores v413 de Olympus.....	67
Figura 4.7 Sistema de emisión/recepción de ultrasonido ultratek modelo usb-ut350 ...	67
Figura 4.8 Fotografías del sistema de tomografía ultrasónica construido a) vista frontal b) vista trasera.....	69
Figura 4.9 Sistema completo	69
Figura 4.10 Esquema del primer prototipo	71
Figura 4.11 Probetas fabricadas (1) con inclusiones de tubo de PVC, (2) con inclusiones de barras de aluminio y (3) inclusion de barras de acero	72
Figura 4.12 Esquema con la ubicación de las inclusiones en el segundo prototipo	72
Figura 4.13 Probetas fabricadas (1) con inclusiones de tubos de PVC, (2) con inclusiones de barras de aluminio y (3) inclusion de barras de acero.	73
Figura 4.14 Barrido 2. Movimiento relativo entre emisor- receptor.	76
Figura 4.15. Barrido 3. a) movimiento rotacional de la probeta. b) movimiento del emisor equivalente.....	77
Figura 4.16 B-scan probeta de hormigón con inclusion de tubos de PVC.....	78
Figura 5.1 Mapa de atenuacion y de velocidades para el primer conjunto de probetas a) Tubos de PVC, b) Barras de aluminio y c) Barras de acero	81
Figura 5.2 Mapa de atenuación completo del segundo conjunto de probetas	82
Figura 5.3 Sinograma de tiempo de vuelo	83
Figura 5.4 Sinogramas atenuación a) escala lineal. b) escala logarítmica primer conjunto de probetas.....	85
Figura 5.5 Sinogramas atenuación a) escala lineal. b) escala logarítmica para el segundo conjunto de probetas	87
Figura 5.6 Reconstrucciones de tiempo de vuelo	88
Figura 5.7 Reconstruccion tomográfica con sinogramas de atenuación para las probetas con inclusión de tubos de PVC a) y c) escala lineal b) y d) escala logarítmica, a) y b) primer conjunto de probetas c) y d) segundo conjunto de probetas	89
Figura 5.8 Reconstrucciones obtenidas en el primer conjunto de probetas.....	90
Figura 5.9 Reconstrucciones elegidas	91
Figura 5.10. Segmentación	93
Figura 5.11 Anchura del haz ultrasónico en el pixelado de la imagen.....	96
Figura 5.12 Variaciones del número de receptores	97
Figura 5.13 Variaciones del número de emisores	99
Figura 5.14 Representación 3D de la reconstruccion tomografica.....	101

Índice de tablas

Tabla 3.1 Propiedades de los materiales utilizados en la simulación	44
Tabla 3.2 Diámetros de los defectos.....	44
Tabla 4.1 Materiales y tamaños de las inclusiones.....	74
Tabla 4.2 . Proporción de la mezcla para las probetas de hormigón	74
Tabla 5.1 Dimensiones estimadas (diámetro y área)a partir de la segmentación.....	95
Tabla 5.2 Dimensiones estimadas (diámetro y área) a partir de la segmentación.....	103

1. Introducción y estado del arte

En este primer capítulo se describe el ámbito general y necesidad de la investigación de la presente tesis. Se realiza una revisión del estado del arte de la tomografía ultrasónica aplicada a materiales cementicios. Igualmente, se establecen los objetivos y la estructura de la tesis.

1.1. Introducción

El incremento del proceso de deterioro en las estructuras de hormigón al estar sometidas a diferentes ambientes agresivos tanto físicos como químicos, provoca un aumento de los costes de mantenimiento, rehabilitación y/o reposición de los mismos. En los próximos años se prevé que será necesario grandes inversiones para la rehabilitación de las infraestructuras de hormigón, tanto en Europa como en América [1] [2]. Ante este panorama es imperativo realizar inspecciones sistemáticas o monitorizaciones que permitan mantener la seguridad en dichas estructuras y mantener los costes de reparación al mínimo. Aunque existe un amplio conjunto de normativas y procedimientos que permiten identificar/cuantificar el estado de deterioro del material, como se recoge en EHE (instrucción normativa que rige en España para el cálculo de estructura de hormigón), estos en su mayoría implican el uso de técnicas destructivas o semi-destructivas. En este contexto el uso de técnicas no destructivas están experimentando un rápido crecimiento ya que permiten identificar defectos o cambios en el material en sus etapas iniciales lo cual permite implementar acciones preventivas y reducir costes de reparación.

Existen diferentes técnicas no destructivas tales como impacto-eco, corrientes inducidas o emisión acústica que pueden ser utilizadas para la detección de grietas, corrosión, u otros defectos [3] [4] [5]. En los últimos años las técnicas ultrasónicas, y en particular la

imagen ultrasónica se están utilizando ampliamente para evaluar la calidad y degradación de las estructuras de hormigón para la identificación de heterogeneidades y microgrietas [3] [6].

Los ultrasonidos han demostrado su versatilidad para la caracterización de estos materiales tanto en laboratorios de investigación como en aplicaciones prácticas. Su uso para la evaluación y caracterización de los procesos de degradación de los materiales cementicios y de construcción en general, se centran en el estudio de las relaciones entre las propiedades físicas y mecánicas de los materiales con la durabilidad y calidad de los mismos. Se determina la resistencia a compresión del material a partir de la relación que existe entre la velocidad ultrasónica y las propiedades elásticas del material, como por ejemplo el módulo de Young, coeficiente de Lamé, o la relación de Poisson [7]. Sin embargo el estudio de su compleja microestructura y poca homogeneidad es un campo de investigación en continuo avance y desarrollo. Estas características provocan una alta dispersión y atenuación de las señales ultrasónicas cuando viajan a través de ellos [8].

Un estudio de la propagación de las señales a través de diferentes tipos de anomalías en tableros de puentes de hormigón se encuentra en [9], en otro estudio similar, la viabilidad en la detección de los defectos internos de una viga de hormigón armado se investigó en [10]. La resistencia del mortero y el hormigón a edades tempranas utilizando la reflexión de las ondas ultrasónicas se puede encontrar en [11], un enfoque similar se puede encontrar en [12]. El uso de la imagen ultrasónica para evaluar las estructuras de hormigón y materiales de construcción en general, va en aumento a la vez que la capacidad de inspección, procesamiento y almacenamiento de la información. Muestra de ello son los diversos grupos de investigación que actualmente están trabajando en este tema. Para obtener la imagen ultrasónica de grandes estructuras, sólo los institutos más desarrollados como el BAM [13, 14], cuentan con prototipos de sistemas automatizados que permiten generar este tipo de imágenes.

Bajo esta motivación y entre las múltiples representaciones y formas de generar esa imagen se ha optado por estudiar la capacidad de la imagen generada mediante tomografía ultrasónica en transmisión para la caracterización del estado del hormigón. El objetivo de esta tomografía es el de proporcionar una imagen de la sección transversal de una estructura a partir de la información de atenuación y velocidad de los pulsos ultrasónicos que se transmiten a través de ella. En el siguiente apartado se hace

un recorrido por la historia en detalle de las diferentes técnicas de evaluación por ultrasonidos, dado la importancia que tienen para la presente tesis.

1.2. Técnicas de evaluación por ultrasonidos

En el campo de los ultrasonidos, un avance significativo ha sido la tomografía ultrasónica. Esta técnica se refiere a la obtención de una imagen de una sección transversal de una estructura que ha sido reconstruida a partir de datos de transmisión o de reflexión producidos al hacer incidir sobre ella, desde varias direcciones, la emisión de una fuente de iluminación [15]. Las ondas ultrasónicas son la fuente de energía que utilizamos cuando hablamos de tomografía ultrasónica para “iluminar” el objeto desde diferentes direcciones.

Este método ha sido empleado en medicina, arqueología, biología, geofísica, oceanografía, ciencia de los materiales y otras. En la mayoría de los casos se basa en un procedimiento matemático llamado reconstrucción tomográfica. Una breve revisión de las técnicas de exploraciones sísmicas e investigación de la aplicación de típicos algoritmos de procesamiento sísmicos en la medicina se puede encontrar en [16].

En los últimos años, se han aplicado diversos métodos en áreas específicas para lograr aportar una alta resolución en las imágenes obtenidas, especialmente para la detección y localización de orificios, conductos, grietas, y mediciones de espesores. Ejemplo de ello es la Técnica de Focalización por Apertura Sintética (*SAFT*, Synthetic Aperture Focusing Technique) y algunas otras técnicas tomográficas [17-19]. El método SAFT fue desarrollado en la Universidad de Michigan por la United States Nuclear Regulatory Commission durante 1970s, concretamente para la inspección no destructiva de cubas a presión y tuberías [20]. Se basa en el cambio de fase no lineal producido en una discontinuidad. Se puede obtener una mejor resolución lateral y una elevada relación señal a ruido analizando este cambio de fase, enfocando mediante una lente ultrasónica sobre todos los puntos de la muestra ensayada.

En el campo ultrasónico, las técnicas más desarrolladas de tomografía son las basadas en la utilización de “arrays” de transductores (equivalente del sistema SAFT) con un

número elevado de elementos operando en pulso-eco controlados electrónicamente. Trabajos recientes sobre esta temática se utilizan en,[21] [22].

El equipo conocido comercialmente bajo el nombre de *MIRA* (Ultrasonic Shear Wave Test Method) es un sistema ingenieril multifuncional de baja frecuencia, diseñado para explorar y evaluar el interior de elementos de hormigón y hormigón reforzado y presforzado, fundamentalmente. Esta técnica, desarrollada por la compañía “Sistemas de Control Acústico Ltd”, de Moscú en Rusia, es utilizada para la búsqueda de defectos (grietas, carcomidos, oquedades), o de objetos como acero de refuerzo o conductos embebidos en el interior de la estructura de hormigón. Cabe decir que el espesor para que éstos puedan ser detectado no debe superar los dos metros. Este equipo está basado en el método de pulso-eco que utiliza transductores de emisión y recepción. Un transductor envía una onda de esfuerzo y un segundo transductor recibe el pulso reflejado. Se mide el tiempo transcurrido desde el inicio del pulso hasta la llegada del eco. La mayoría de los sistemas que utilizan este método trabajan a bajas frecuencias, haciendo vibrar sus transductores de 50 a 100 kHz; el sistema MIRA es capaz de operar de 15 a 150 kHz [23]. Cabe destacar que las resoluciones son limitadas y la reconstrucción tomográfica solo muestra defectos de 2-3 cm de tamaño.

Este equipo ha sido empleado para evaluar la geometría e integridad de piedras, monumentos y estructuras de hormigón. Las imágenes obtenidas además de la geometría del objeto muestran alteraciones internas no visibles en la superficie exterior como huecos y grietas,[24, 25] . Una combinación de técnicas ultrasónicas e impedancia eléctrica para la caracterización de materiales cementicios se puede encontrar en [26].

Sin embargo, en la inspección ultrasónica de materiales cementicios, la técnica más extendida es la de transmisión empleando un número limitado de transductores. Basándose en la transmisión, las primeras aplicaciones de la tomografía ultrasónica fueron propuestas en 1974 por un grupo de investigadores encabezados por J. F. Greenleaf y sus colaboradores [27].

Las bases matemáticas de la tomografía computarizada, fueron establecidas por el matemático austriaco Johann Radon en 1917 mediante su teorema, a través del cual demuestra la posibilidad de recuperar una función de dos variables si se conocen las integrales de la misma en todas las líneas del plano medidas en un experimento [28].

Este resultado equivale a que se puede reconstruir la imagen de un objeto bidimensional si se conoce suficiente información del objeto en cada una de las líneas que lo cruzan. Pero no es hasta 1972 que se inventa el primer escáner de tomografía computarizada de rayos X, por lo cual G.N Hounsfield recibió el Premio Nobel [29] utilizando técnicas algebraicas, que compartió con Alan McCormack por descubrir algunos de los algoritmos de reconstrucción. La gran importancia que obtuvo la tomografía computarizada se debe al desarrollo posterior de distintos algoritmos de reconstrucción que permiten reconstruir la imagen deseada a partir de proyecciones. Una descripción bastante detallada de la tomografía computarizada se puede encontrar en [30]. Numerosas aplicaciones donde el problema de reconstrucción juega un papel principal están descritos por Stanley R. Deans en [31].

Existen otros tipos de tomografía, por ejemplo la tomografía por *reflexión ultrasónica*, se usa para la localización y medición de discontinuidades, erosión y corrosión de metales, así como para caracterización de oquedades e inclusiones. Esta tomografía es análoga a la inspección ultrasónica por pulso eco. Es la técnica en la cual los ecos procedentes del “backscattering” de un volumen situado más allá de la región central de un haz directivo ultrasónico son integrados y representados mientras la región central es inspeccionada. La amplitud de la señal recibida representa la atenuación de la muestra en su volumen central. Esta técnica trabaja bien cuando se tiene un volumen uniforme y homogéneo. Desde que la técnica fue demostrada hace algo más de 35 años, ha sido muy poco explorada, hasta que recientemente ha comenzado a resultar de interés y ha sido un campo de investigación prolífico, particularmente cuando se combina con modelos de compensación para la atenuación medida [32].

Dado que gran parte de la energía ultrasónica emitida es dispersada, el transductor receptor debe tener una gran sensibilidad así como una electrónica adicional para la medida de las señales reflejadas con una buena relación señal a ruido (SNR). Para la reconstrucción de la imagen a partir de estas señales se implementa un método basado en el tiempo de llegada del pulso ultrasónico, $t=2r/c$ donde r es la distancia desde el emisor hasta la superficie del objeto y c es la velocidad acústica en el medio.

En el caso de la Tomografía Doppler, un amplio (pero estrecho) haz ultrasónico es rotado alrededor de la muestra a reconstruir. Los reflectores y dispersores en el interior de la muestra devuelven ecos que corresponden a un desplazamiento Doppler en la frecuencia. El espectro de frecuencias adquiridas en un conjunto de ángulos alrededor

de la muestra representa un conjunto de perfiles de medida de las correspondientes posiciones radiales de los reflectores y dispersores por lo que la muestra puede ser reconstruida. La tomografía Doppler ultrasónica emplea una onda ultrasónica continua por lo que es una técnica de ancho de banda estrecho y de alta sensibilidad. A partir de las variaciones en la amplitud es posible obtener reconstrucciones tomográficas [33-35].

1.3. Estado del arte de la tomografía ultrasónica en transmisión aplicada a materiales cementicios

La tomografía ultrasónica en transmisión puede ser empleada para la evaluación no destructiva en materiales cementicios, altamente dispersivos como el hormigón, brindando la posibilidad de observar las anomalías internas que puedan existir al combinar información de varias trayectorias interconectadas, lo cual minimiza la posibilidad de perder algún defecto debido a una orientación desfavorable o de algún tamaño pequeño. En tomografías obtenidas mediante transmisión ultrasónica, la imagen que resulta es una reconstrucción en dos dimensiones formada a partir de diferentes A-scan (o señales ultrasónicas representadas en la forma amplitud frente al tiempo) unidimensionales.

Para el empleo de la tomografía en el ámbito de la construcción se han adaptado algunos de los procedimientos desarrollados en las exploraciones geofísicas y los resultados han mostrado una razonable aproximación al tamaño y extensión de las anomalías internas. Defectos internos y grietas han sido localizados mediante imagen tomográfica acústica en laboratorio [36],[17] y también en obra [37]. Una modelización numérica de fracturas en el hormigón e imagen Geofísica está desarrollada en [38].

En 1996, Montoto y colaboradores [39] utilizaron un método basado en principios geométricos, que combina los parámetros de la señal ultrasónica con la medida de muchos puntos de coordenadas, para lograr una tomografía tridimensional de una piedra de megalito en posición vertical en el noroeste de España.

Con ondas electromagnéticas de alta frecuencia se puede lograr una buena resolución utilizando la técnica de Radar de Penetración Terrestre (*GPR*, Ground Penetrating

Radar) sin embargo, se reduce notablemente la precisión para el caso de hormigón armado debido a la presencia de las barras en la armadura [19]. Esta variante de tomografía ultrasónica responde al método de la transiluminación ultrasónica que se ha empleado ampliamente en sistemas de inspección sónica y georradar [40, 41]. El método consiste en desplazar los transductores emisor y receptor a lo largo de superficies enfrentadas y detectar los tiempos de llegada del pulso ultrasónico, recorriendo diferentes trayectorias cruzadas.

La tomografía acústica se ha utilizado para la evaluación de mampostería de piedra [42] pero casi siempre es necesario extraer una muestra para realizar pruebas microestructurales y/o mecánicas.

Se utilizaron las ondas de superficie y el procesamiento digital en [43], para medir el deterioro de la piedra a través de la atenuación. De la inspección ultrasónica, pueden ser extraídos diferentes parámetros para la evaluación de los mismos, pero en el caso de geometrías complejas y/o materiales atenuantes esta información es de difícil interpretación.

Por eso, una de los principales problemas en discusión en la reconstrucción tomográfica es, si es más adecuada para la evaluación de estos materiales, utilizar los cambios de amplitud de la señal ultrasónica transmitida, atenuación [44, 45], o si es mejor utilizar las tomografías que se obtienen a partir del tiempo de propagación de la onda ultrasónica, velocidad [46, 47]. Por ejemplo, se han desarrollado sistemas de tomografía ultrasónica computarizada para la inspección del Hormigón utilizando tiempo de vuelo y reconstruyendo con la técnica de retroproyección filtrada en [16, 48, 49]

En otro trabajo más reciente utilizan el tiempo de vuelo para la reconstrucción de la imagen tomográfica en tres prismas de hormigón con diferentes resistencias a la compresión y un modelo con dos composiciones de hormigón diferentes. Vladimir Guilherme Benigual, y L.M.J desarrollaron el software “TUSom” para resolver por tres vías el sistema de ecuaciones, por mínimos cuadrados, ART y SIRT. Este da como resultado un mapa de falsos colores teniendo en cuenta las velocidades de ondas, pero la interpretación es difícil y la gama de colores puede ocultar los daños presentados en la muestra [50].

Un estudio sobre tomografía ultrasónica como técnica de evaluación no destructiva de materiales se encuentra en [51], la autora presupone la propagación rectilínea de los ultrasonidos con una geometría uniforme donde los rayos van en una misma dirección equiespaciados. Los transductores, el emisor y el receptor de ultrasonidos hay que moverlos en cada medida por lo que este método es más lento y menos fiable que la geometría de reloj que se utilizará en este trabajo donde el emisor permanece fijo en la misma posición durante varias medidas y el receptor se mueve en posiciones equiespaciadamente angularmente.

En otro artículo los autores emplean una técnica de tomografía sónica para la evaluación no destructiva de estructuras de hormigón donde investigan la idoneidad de las ondas Rayleigh en vez de las longitudinales, generadas por impacto y capturadas mediante acelerómetros [52].

El artículo más completo encontrado en esta temática presenta resultados mediante simulación y experimentación en laboratorio de la reconstrucción tomográfica en hormigón variando diferentes parámetros ultrasónicos tales como frecuencia, longitud de onda, y el efecto de la utilización del rayo curvo, en la calidad de la reconstrucción tomográfica del tiempo de vuelo [46]. Kim y Fratta realizan la reconstrucción a través de un software comercial GEOTOM que utiliza como algoritmo de reconstrucción el SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique). Cabe destacar que la solución con rayos curvos no mejoró el resultado de la reconstrucción comparado con los rayos rectos.

Por último, destacar dos contribuciones recientes,[53] [54] en la que se presentan tanto resultados simulados como experimentales en probetas prismáticas de hormigón.

1.4. Objetivos y estructura de la tesis

El objetivo principal de esta tesis es evaluar la capacidad de las imágenes tomográficas en transmisión por ultrasonidos basadas en medidas de atenuación y velocidad para localizar, detectar y estimar los materiales más comunes embebidos en hormigón, refuerzos o huecos, tanto naturales como artificiales.

Para alcanzar este objetivo se han planteado los siguientes objetivos parciales:

- Diseñar y construir un tomógrafo ultrasónico por transmisión.
- Desarrollar una metodología para la inspección de probetas cilíndricas de hormigón con materiales embebidos.
- Estudiar e implementar de los métodos de reconstrucción tomográficos para inspecciones ultrasónicas aplicadas a hormigón.

La memoria se ha estructurado en 6 capítulos:

En este primer capítulo se ha realizado un breve recorrido de los inicios de la evaluación no destructiva por ultrasonidos y se ha presentado el estado de las arte de las técnicas tomográficas en transmisión para la evaluación de los materiales cementicios.

En el segundo capítulo se presentan la definiciones básicas, se establece la notación y se desarrollan y repasan los conceptos básicos relacionados con las señales ultrasónicas, las imágenes ultrasónicas y la tomografía ultrasónica de transmisión.

En el tercer capítulo se realizan un conjunto de simulaciones que permiten obtener un conocimiento más profundo de la propagación de ondas y el fenómeno de dispersión en hormigones que contienen inclusiones, así como seleccionar los parámetros más importantes de un sistema tomográfico de inspección por ultrasonidos.

En el cuarto capítulo se presenta el montaje experimental. Primeramente se describe al sistema de tomografía ultrasónica en transmisión para probetas con simetría cilíndrica “IMAUSHOR” que ha sido utilizado para obtener las señales experimentales. Seguidamente se muestran el conjunto de probetas con barras/tubos embebidos de diferentes tamaños y materiales que serán inspeccionados para finalizar detallando el procedimiento así como los parámetros utilizados en las inspecciones.

En el quinto capítulo se exponen y analizan los resultados experimentales. Primeramente se realiza un estudio comparativo de los sinogramas, tanto de atenuación como de velocidad. Estos han sido calculados a partir de las señales experimentales obtenidas con el sistema tomográfico explicado en el capítulo anterior. A partir de estos sinogramas se han reconstruido las imágenes tomográficas. Se presentan las

reconstrucciones tomográficas de las probetas en ciertas cotas, así como las imágenes tridimensionales axiales. Finalmente, mediante un procedimiento de segmentación de imágenes, se realiza un estudio cuantitativo de la detección y estimación de los diámetros de las inclusiones.

La tesis finaliza con el sexto capítulo dedicado a las conclusiones y líneas de investigaciones futuras.

2. Fundamentos de la tomografía ultrasónica de transmisión

En este capítulo se presentan la definiciones básicas, se establece la notación y se desarrollan y repasan los conceptos básicos relacionados con las señales ultrasónicas, las imágenes ultrasónicas y la tomografía ultrasónica de transmisión. Se pretende proporcionar la visión de conjunto necesaria que prepara la exposición de los siguientes capítulos.

2.1. Principios básicos de las señales ultrasónicas

Las ondas acústicas son oscilaciones mecánicas que tienen lugar en el tiempo y en el espacio, y que a diferencia de las ondas electromagnéticas necesitan de un medio material para propagarse. En el seno de estos medios, las partículas son desplazadas de su posición de equilibrio dando lugar a una perturbación que se propaga por el material [55].

Entre los parámetros que caracterizan una onda acústica podemos mencionar:

- **La amplitud** (A), desplazamiento máximo de la partícula desde su posición de equilibrio
- **La frecuencia** (f), número de oscilaciones de una partícula por segundo, que se corresponde con la inversa del periodo (T)
- **La velocidad** de propagación (c)
- **La longitud de onda** (λ), distancia entre dos planos en los cuales las partículas están en el mismo estado de movimiento, es decir, en fase.

En aplicaciones ultrasónicas para hormigones se emplean frecuencias que oscilan entre 50 kHz y 500 kHz. La longitud de onda, λ , depende de la frecuencia, f , seleccionada y de la velocidad de propagación c , tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [2.1]$$

La longitud de onda es un parámetro muy importante en la resolución de las medidas realizadas. Teniendo en cuenta la expresión anterior, para un hormigón con velocidad de propagación de 5000 m/s e inspeccionado con una frecuencia de 50 kHz tendríamos una $\lambda = 10\text{cm}$, por lo que defectos o inclusiones inferiores a ese tamaño no podrían ser detectados.

Impedancia Acústica

La impedancia acústica de un medio, Z , se define como la relación entre la presión acústica, p , y la velocidad de la partícula, v . Por otra parte, se puede calcular a partir de la densidad del material por el que viaja la onda acústica, ρ , y velocidad de transmisión, c , del medio mediante la siguiente expresión:

$$Z = \frac{p}{v} = \rho c \quad [2.2]$$

Un cambio brusco de impedancias en el medio de propagación provoca que gran parte de la energía se refleje, y solo una pequeña parte se trasmita al segundo medio. Si se emplea un transductor de contacto directo con un objeto sólido, es muy probable que queden huecos de aire entre ambos, y en consecuencia se transmitirá muy poca potencia al objeto que se pretende insonificar. Para realizar una inspección de forma correcta, es necesario utilizar un medio de acoplamiento que reduzca la diferencia de impedancias entre el transductor y el objeto bajo estudio.

Para las inspecciones de tomografía ultrasónica en transmisión que se utilizaran en este trabajo se empleará el agua como medio de acoplamiento en inmersión, ya que permite que haya la mayor transmisión de energía hacia el material bajo estudio, el acoplamiento se mantiene constante y ofrece una gran facilidad para el movimiento del transductor.

Difracción y dispersión de las ondas ultrasónicas

La difracción es un fenómeno ondulatorio que puede ser entendida utilizando el principio de principio de Huygens. Este establece que todo punto de un frente de ondas se puede considerar como un nuevo foco de ondas secundarias que se propagan en todas direcciones. La envolvente de todas las ondas secundarias forma el nuevo frente de ondas.

Un cambio de impedancias en el medio de propagación provoca que el fenómeno de reflexión sea acentuado, y se puede decir que esta zona con impedancia acústica muy distinta a la del material actúa como un obstáculo. Cuando una onda acústica encuentra en su camino un obstáculo de un tamaño mucho mayor que la longitud de onda, se produce un bloqueo de la onda, produciéndose una zona de sombra detrás del obstáculo.

Cuanto más pequeño sea el obstáculo comparado con la longitud de onda, menos pronunciada será la sombra. Si el obstáculo tiene dimensiones comparables a la longitud de onda, el frente de ondas rodea el obstáculo o se propaga por una abertura si la hay. Este fenómeno ondulatorio se conoce como dispersión.

Tipos de ondas ultrasónicas. Modos de propagación

Cuando una perturbación ultrasónica se propaga por un medio infinito se pueden identificar diferentes modos de propagación según sea la relación entre la dirección del movimiento de oscilación de las partículas y la del frente de ondas acústico.

- **Onda longitudinal o de compresión**, se produce cuando el movimiento de oscilación de las partículas coincide con la dirección de propagación del frente acústico. Es el único tipo de onda que se transmite en materiales líquidos, sólidos y gases, siendo la más utilizada en aplicaciones industriales. Su velocidad de propagación es la más alta de todas.
- **Ondas transversales o de cizalladura**, se producen cuando el movimiento de oscilación de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación del frente de ondas. Estas ondas sólo se transmiten en materiales sólidos y su

velocidad es aproximadamente la mitad de la velocidad de las ondas longitudinales.

- **Ondas superficiales o de Rayleigh**, estas ondas solo se propagan por la superficie de materiales con una penetración de aproximadamente de una longitud de onda. El movimiento de las partículas tiene una órbita elíptica. Su velocidad es aproximadamente un 90% de la velocidad de las ondas transversales y solo se transmite en sólidos.
- **Ondas Lamb**, son las que aparecen en vez de las superficiales cuando el espesor es inferior o del mismo orden que la longitud de onda. Estas ondas tienen unas vibraciones complejas, que viajan a través de todo el espesor del material. La propagación de estas ondas depende de la densidad y de las propiedades elásticas del material y están muy influenciadas por la frecuencia utilizada y el espesor del material.

Parámetros fundamentales extraídos de una inspección ultrasónica

- **Velocidad ultrasónica**: La velocidad a la que los ultrasonidos se transmiten por un medio determinado depende de la densidad y de la elasticidad de dicho medio. La velocidad se calcula utilizando el tiempo de propagación del pulso ultrasónico.
- **Atenuación**: El pulso ultrasónico transmitido sufre una pérdida en amplitud a medida que se propaga por el interior de un material. El coeficiente de atenuación es característico de cada material y define la pérdida de energía por unidad de longitud. En general la atenuación posee una relación exponencial con respecto a la distancia de propagación y en ella se mezclan fenómenos de absorción, producidos por el roce de las partículas vibrantes y la dispersión producida por la naturaleza heterogénea del medio de propagación [9]. La Figura 2.1 ilustra este fenómeno.

Figura 2.1 Atenuación.

- **Frecuencia centroide:** Es una medida basada en el procesamiento de la señal ultrasónica recibida. La obtención de la frecuencia centroide se lleva a cabo a partir de la transformada de Fourier [10, 11].

2.2. La imagen ultrasónica

La inspección de materiales por ultrasonidos requiere emitir, recibir e interpretar señales que atraviesan el material sometido a ensayo. Existen dos técnicas básicas para realizar las inspecciones en cuanto a la forma de emisión-recepción:

- **Técnica de inspección pulso-eco,** un único transductor actúa de emisor y receptor. En esta técnica se detectan los pulsos ultrasónicos que se reflejan en las discontinuidades del material tal y como se muestra en la Figura 2.2. Estas discontinuidades pueden proceder de la geometría del material (por ej. los áridos gruesos del hormigón), o de defectos internos (por ejemplo, las grietas internas en el material).

Figura 2.2 Técnica de inspección pulso-eco

- **Técnica de inspección por transmisión** o de transparencia en la que la pieza se coloca entre dos transductores, uno que emite y el otro que recibe. Las ondas ultrasónicas son emitidas por el transmisor, viajan por el interior del material y son recibidas por el receptor tal y como se muestra en la Figura 2.3. La amplitud y la posición del pulso ultrasónico recibido por el receptor proporciona información de los defectos o inclusiones en el interior de la pieza inspeccionada.

Figura 2.3 Técnica de inspección por transmisión

Imágenes ultrasónicas básicas

Las inspecciones de ensayos no destructivos se pueden realizar manualmente utilizando medidas puntuales o de forma automática, estas últimas más utilizadas en aplicaciones industriales. En las inspecciones automáticas se realiza un barrido de toda la pieza y se almacenan los datos para producir las imágenes ultrasónicas. Hay tres tipos diferentes de barrido: mecánico, electrónico y mixto. En el primero se mueven los transductores, en el segundo se varía la focalización mediante arrays ultrasónicos, y en tercero se mueve el array a la vez que se focaliza. Los barridos permiten obtener imágenes en dos dimensiones, 2D, o en tres dimensiones, 3D, las cuales nos dan una información volumétrica de la pieza inspeccionada. En general, en la bibliografía clásica referente a imágenes ultrasónicas [56], existen cuatro tipos básicos de representación:

- **A-Scan:** Aunque se clasifica como imagen ultrasónica, en realidad es una representación de la variación de la presión ultrasónica con respecto a la profundidad de penetración, donde el transductor se mantiene en una posición

estática. En el eje de abscisas se representa el tiempo o distancia si conocemos la velocidad y en el eje de ordenadas la amplitud de la señal.

- **B-Scan:** Es una imagen formada por un conjunto de A-Scans. Se forma mediante el barrido en una dirección, en el eje de abscisas se representa la posición del transductor y en el eje de ordenadas el tiempo o la distancia si conocemos la velocidad. El falso color representa la amplitud de la señal ultrasónica. Es una representación de plano paralelo al barrido realizado por el transductor.

Figura 2.4 Imágenes ultrasónicas a) A-Scan, b) B-Scan y c) C-Scan y D-Scan.

- **C-Scan:** Nos brinda la información de amplitud y la información del tiempo respectivamente. La imagen se forma mediante el barrido en dos direcciones. En el C-Scan se representa el máximo de la amplitud en una ventana de tiempo o profundidad. Una imagen C-Scan representa, utilizando falso color, el tiempo que tarda el sonido en reflejarse en el medio o interfaz que se explora.
- **D-Scan:** Se construye con las posiciones de los máximos del C-Scan. Las imágenes C-Scan y D-Scan son propias de la técnica de transmisión ultrasónica.

La Figura 2.4 muestra las imágenes ultrasónicas hasta ahora descritas.

Tomografía ultrasónica de transmisión

La tomografía ultrasónica de transmisión se suele clasificar como una técnica de imagen ultrasónica avanzada.

Figura 2.5 Obtención de la imagen tomográfica

La Figura 2.5 muestra el proceso de generación de una imagen tomográfica. En la Figura 2.5 (a) se muestra la disposición física en anillo de los transductores en el tomógrafo. El escenario que se quiere visualizar se encuentra dentro de dicho anillo. El transductor situado en la parte superior, el transmisor, emite una onda ultrasónica que es recibida por el resto de los transductores, los receptores. Las medidas puntuales (que pueden ser de tiempos o amplitudes) de los receptores forman la primera columna de la imagen mostrada en la Figura 2.5 (b). Dicha imagen se conoce como sinograma. A continuación, tanto el transductor emisor como los receptores se mueven angularmente un número determinado de grados. Nuevamente, el transmisor emite una onda ultrasónica que es captada por los receptores formando la segunda columna del sinograma. Este proceso se repite hasta realizar una vuelta completa alrededor del escenario y completar el sinograma. A partir de dicho sinograma y utilizando métodos de reconstrucción tomográfica, es posible construir la imagen del escenario inspeccionado mostrado en la Figura 2.5 (c). Precisamente, el siguiente apartado está dedicado a explicar los principios de los métodos de reconstrucción tomográfica que permiten obtener la imagen final.

2.3. Métodos de reconstrucción tomográfica

Como se ha explicado, la obtención de una imagen tomográfica se realiza a partir del sinograma formado por las medidas que se han obtenido del material inspeccionado. Existen diferentes algoritmos que tomando como entrada el sinograma, son capaces de

realizar la reconstrucción de la imagen. Aunque existen numerosos métodos [57], los más utilizados son los basados en métodos analíticos y los basados en métodos algebraicos.

Aunque no sea objeto de estudio en este trabajo, mencionar que investigaciones de las redes neuronales basadas en funciones de base radial se han aplicado en la resolución del problema inverso de reconstrucción tomográfica [58] para la sensorización de turbulencias en fluidos. De igual forma, en [12] se propuso también un sistema basado en RBFs, pero en este caso para la obtención de tomografías se aplicó la técnica de la capacitancia eléctrica.

La Figura 2.6 muestra un esquema que permite explicar los principales conceptos relacionados con la reconstrucción tomográfica de transmisión utilizando rayos paralelos. La pareja transmisor-receptor rota alrededor del objeto de interés. Para cada ángulo, la emisión de los transmisores se propaga a través del objeto bajo estudio y llega hasta los receptores. Al conjunto de las medidas realizadas en una misma dirección se la denomina proyección y el conjunto de proyecciones es el sinograma. La formulación matemática de la proyección se puede expresar como la integral en línea de la distribución bidimensional f , que representa el valor de alguna propiedad física de una sección del objeto bajo estudio, a lo largo de la curva γ , cuando el transmisor-receptor forman un ángulo θ .

$$p_{\theta}(r) = \int_{\gamma} f dl \quad [2.3]$$

Figura 2.6 Tomografía en transmisión utilizando rayos paralelos

El objetivo de los métodos de reconstrucción tomográfica es resolver el problema inverso, es decir, a partir de todas las proyecciones, $p_\theta(r)$, $-\pi \leq \theta \leq \pi$, obtener la función, f , en cada uno de los puntos de la sección del objeto. En los siguientes apartados se presentan dos de las familias de métodos de reconstrucción tomográfica más referenciados en la literatura: Los métodos de reconstrucción analíticos y los algebraicos. Se va a realizar especial hincapié en estos últimos puesto que son los utilizados en esta tesis.

2.3.1. Métodos de reconstrucción analíticos

El enfoque utilizado por los métodos analíticos parte de la formulación de un modelo matemático del problema en el que tanto las proyecciones como la función objeto se definen de forma continua. La resolución del problema se realiza en este caso de forma analítica, adaptando después la solución a los datos reales discretos. Los métodos de reconstrucción analíticos están basados en dos herramientas matemáticas: la Transformada de Radon que relaciona una imagen con las proyecciones generadas por las integrales en línea y el teorema ‘Fourier Slice’ que relaciona la transformada de Fourier unidimensional de las proyecciones con la transformada de Fourier bidimensional del objeto, evaluada en uno de sus radicales, a partir de las cuales, mediante la transformada de Fourier bidimensional inversa, se reconstruye la imagen tomográfica.

Por tanto, utilizando la transformada de Radon, que define la relación entre la imagen inspeccionada y sus proyecciones, es posible escribir:

$$p_\theta(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - r) dx dy \quad [2.4]$$

La ecuación anterior expresa la integral en línea mostrada en Ec. 2.3 utilizando variables cartesianas y la distribución delta de Dirac.

Los métodos analíticos de reconstrucción se derivan del Teorema conocido como ‘Fourier Slice’. Este teorema afirma que la proyección correspondiente al ángulo θ , es igual a la transformada de Fourier bidimensional de $f(x, y)$ evaluada en el radial que

forma un ángulo θ con el eje de abscisas del plano frecuencial [57], [51]. Son numerosas las variantes encontradas en la aplicación de este teorema para el problema de reconstrucción, sin embargo, las más ampliamente extendidas son:

Aplicación directa del teorema ‘Fourier Slice’

En este método se aplica directamente la transformada FFT inversa 2D [59], también es conocido como interpolación en el dominio de la frecuencia [60].

La implementación de este método se realiza en tres pasos:

- 1- Realización de la transformada de Fourier de la proyección $p_\theta(t)$.
- 2- Posicionamiento de la transformada en 2D en el espacio Fourier de acuerdo con el mismo ángulo de proyección en el que fue tomado. La realización de este paso presenta, entre otros, los siguientes problemas:
 - La densidad de los puntos en el centro es mayor que en los puntos alejados del centro (problemas para la retroproyección).
 - La interpolación de esas muestras radiales no uniformes en una muestra rectangular es un paso necesario para la reconstrucción de la imagen.
- 3- Retroproyección: Consiste en la realización de la Transformada FFT inversa 2D y así obtener la imagen reconstruida.

Método de retroproyección filtrada

El algoritmo de retroproyección filtrada fue propuesto por Bracewell y Riddle [61] independientemente de algunas contribuciones adicionales más tarde por Ramachandran y Laskshminarayanan [62]. Es el algoritmo más utilizado en la actualidad en los equipos comerciales de rayos X con aplicaciones médicas. Con respecto al método anterior, en este se propone un filtrado para eliminar el fenómeno del emborronamiento en las imágenes reconstruidas.

El método de retroproyección filtrada se puede resumir en tres pasos [57], [60]:

- Realizar la transformada de la proyección $p_\theta(t)$.
- Filtrar la transformada utilizando un filtro paso alto para eliminar el emborronamiento de la imagen reconstruida.

$$q_{\theta}(r) = F^{-1}\{|\omega|P_{\theta}(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} |\omega| P_{\theta}(\omega) e^{j\omega t} dt \quad [2.5]$$

- Reconstruir utilizando retroproyección

$$f(x, y) = \int_{\theta=-\pi}^{\pi} q_{\theta}(x\cos\theta + y\sin\theta) d\theta \quad [2.6]$$

2.3.2. Métodos de reconstrucción algebraicos

Los algoritmos de reconstrucción algebraicos formulan un modelo matemático del problema con valores discretos de las proyecciones y de la función objeto. Estas fórmulas discretas dan lugar a un sistema lineal de ecuaciones cuya solución se encuentra de forma numérica mediante un proceso iterativo. Existen diversas variantes de algoritmos algebraicos (ART, SIRT, SART, MART), cada uno converge de forma diferente a la solución final del sistema.

Figura 2.7 Fundamentos de los métodos algebraicos

La Figura 2.7 muestra los diferentes elementos que intervienen en la reconstrucción algebraica. En ella se discretiza la sección del objeto bajo estudio utilizando una malla cuadrada. Se considera que los valores de la imagen se suponen constantes dentro de cada celda de la malla. Cada una de las celdas se describe con f_n , $1 \leq n \leq N$. En este caso, sin pérdida de generalidad, el transmisor emite la energía en forma de abanico donde p_m representa la proyección en las diferentes posiciones de los receptores, $1 \leq m \leq M$. El resultado de una inspección completa, es decir, todas las proyecciones para una determinada sección en la que se consideran todas las posiciones de los transmisores y los receptores se denomina sinograma.

El camino del haz de energía que finalmente resulta en cada una de las proyecciones, que denominaremos rayo, intercepta de forma completa, parcial o nula a cada una de las celdas de la imagen. Por ello, es necesario definir el coeficiente $0 \leq w_{m,n} \leq 1$ ($1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N$) como la proporción del área del rayo dentro de la celda y el área total de la celda, que a partir de ahora se denominará peso y que únicamente depende de la geometría del tomógrafo [13] [15] Figura 2.8:

Figura 2.8 Definición de peso

Donde m es el índice que corresponde a cada uno de los rayos y n es el índice de cada una de las celdas de la malla superpuesta a la imagen. Es interesante destacar aquí que la mayoría de los coeficientes $w_{m,n}$ son cero ya que el rayo no pasa por la mayoría de las celdas.

Por tanto, es posible escribir la relación entre la imagen, las proyecciones y los pesos mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 w_{1,1} \cdot f_1 + w_{1,2} \cdot f_2 + w_{1,3} \cdot f_3 + \cdots + w_{1,N} \cdot f_N &= p_1 \\
 w_{2,1} \cdot f_1 + w_{2,2} \cdot f_2 + w_{2,3} \cdot f_3 + \cdots + w_{2,N} \cdot f_N &= p_2 \\
 &\vdots \\
 w_{M,1} \cdot f_1 + w_{M,2} \cdot f_2 + w_{M,3} \cdot f_3 + \cdots + w_{M,N} \cdot f_N &= p_M
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

Cada una de estas ecuaciones corresponde a un rayo. Las proyecciones p_m son el resultado de la suma del producto de cada peso $w_{m,n}$ con el valor de la imagen en cada celda, f_n .

$$p_m = \sum_{n=1}^N w_{m,n} \cdot f_n \quad [2.8]$$

Esta expresión, no es más que la formulación discreta de la integral de camino mostrada en la ecuación 2.3.

Una inspección tomográfica, usualmente consiste en miles de estas ecuaciones, (rayos), que por conveniencia se suelen expresar mediante una formulación matricial:

$$\mathbf{p} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{f} \quad [2.9]$$

Donde $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_N]^T$ es el vector que representa a la imagen, $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_M]^T$ es el vector de proyecciones o sinograma, y $\mathbf{W}$ es la matriz de pesos de dimensiones $M \times N$ cuyo elemento genérico es $w_{m,n}$.

Hasta aquí se ha descrito el problema de la tomografía mediante una formulación discreta. Sin embargo, la información proporcionada por el tomógrafo son las proyecciones, que junto a la matriz de pesos nos permitirán obtener la imagen reconstruida. Una primera aproximación que nos sugiere la fórmula consiste en resolver el sistema de la siguiente manera:

$$\mathbf{f} = \mathbf{W}^{-1} \cdot \mathbf{p} \quad [2.10]$$

Esta solución implica la inversión de la matriz $\mathbf{W}$. Sin embargo, las filas de esta matriz no son linealmente independientes y casi todos sus valores son ceros, lo que hace que sea dispersa, y, por tanto, está mal condicionada [63].

En estas condiciones la aplicación de procedimientos estándares, o de métodos clásicos de inversión de matrices como el método de Cramer, mínimos cuadrados, la descomposición en valores singulares o técnicas directas similares no es recomendable.

La inversión se realiza utilizando métodos de naturaleza iterativa específicos para invertir este tipo de sistemas que a continuación se explican.

Los métodos algebraicos resuelven la ecuación 3.8 utilizando técnicas iterativas. Estos métodos fueron propuestos por primera vez por S. Kaczmarz en 1937 [64] y son especialmente adecuados cuando las matrices son fuertemente dispersas.

Según la forma de calcular las correcciones, y el momento en el que se aplican, se pueden definir diferentes tipos de algoritmos algebraicos [65]. A continuación sólo se describen las principales familias de algoritmos algebraicos (ART, SIRT, SART) comúnmente clasificados como métodos aditivos, ya que el factor de corrección que se aplica a la imagen es siempre un término que se suma al valor actual de la función objeto. Por otra parte, también existen otros algoritmos algebraicos clasificados como métodos multiplicativos, como son los MART, ya que el factor de corrección multiplica a la función objeto.

Método ART

La Técnica de Reconstrucción Algebraica (ART) fue propuesta por Gordon, Bander y Herman en 1970 para resolver el problema de la reconstrucción en tres dimensiones de las proyecciones en microscopía electrónica y radiología en tomografía computarizada [66]. En la actualidad es común en la bibliografía utilizar estas siglas para referirse en sentido general a los algoritmos de reconstrucción basados en métodos algebraicos.

El algoritmo ART es un método iterativo que permite encontrar la solución al sistema de ecuaciones mostrado en la ecuación 2.8. Las Figuras 2.9 y 2.10 ilustran de forma gráfica los principios de este método [17]. Si se considera que cada una de las ecuaciones del sistema mostrado en la ecuación 2.5 representa un hiperplano de N dimensiones, es decir, tiene tantas dimensiones como píxeles tiene la imagen a reconstruir, la búsqueda de la solución se realiza realizando aproximaciones sucesivas. Primero se comienza con un valor inicial y en cada iteración se realiza una corrección, obteniéndose un nuevo valor. Esta corrección se obtiene proyectando el último valor estimado perpendicularmente al siguiente hiperplano que es la siguiente ecuación.

En la Figura 2.9 muestra el caso en el que el número de ecuaciones es igual al número de incógnitas ($N=M=2$). Estos se cortan en un único punto, que precisamente es la solución o imagen reconstruida.

Figura 2.9 Solución iterativa cuando el número de ecuaciones es igual al número de incógnitas

En la Figura 2.10 se muestra el caso en el que hay más ecuaciones que incógnitas ($N=2, M=3$) y en el que se incluye el efecto del ruido. En este caso, el algoritmo converge hacia una región de soluciones.

Figura 2.10 Solución iterativa cuando el número de ecuaciones es mayor que al número de incógnitas

La generalización de este proceso se puede representar como:

$$\mathbf{f}^{(k+1)} = \mathbf{f}^k + \lambda \frac{(\mathbf{p}_{(k+1)} - \mathbf{w}_{(k+1)}^T \mathbf{f}^k)}{\|\mathbf{w}_{(k+1)}\|^2} \mathbf{w}_{(k+1)} \quad [2.11]$$

Donde $\mathbf{w}_{(k+1)}^T$ es el vector que contiene los coeficientes de la fila (k+1)-ésima del sistema de ecuaciones, o lo que es lo mismo, la fila (k+1)-ésima de la matriz $\mathbf{W}$, $\mathbf{f}^{(k)}$ es el vector que representa la imagen reconstruida en la iteración k-ésima y, por último, λ que es el factor relajación y toma valores entre 0 y 1 [8]. Cuanto menor sea este factor, más lentamente nos acercamos a la solución y mejor es la calidad de la imagen reconstruida, pero mayor es el tiempo que se tarda en encontrar la solución, mientras que si este factor es grande, puede provocar la inestabilidad de la convergencia. En [60] se muestra con detalle la deducción de la expresión anterior.

Método SIRT

La Técnica de Reconstrucción Iterativa Simultanea” (SIRT) es una variación del algoritmo ART que fue desarrollada por Gilbert en 1972 [67]. La aportación de este método es que realiza las correcciones de la imagen únicamente cuando se han calculado todas las correcciones de todos los rayos. El resultado es una imagen mucho más suave y, en general, consigue muy buenas reconstrucciones con sólo una iteración.

Se ha probado este método en las reconstrucciones de tomografías ultrasónicas y es el que mejores resultados ha proporcionado. Debido a su comportamiento estable y robusto es el método escogido para la reconstrucción de todas las imágenes que aparecen en esta tesis.

Método SART

La Técnica de Reconstrucción Algebraica Simultanea (SART) fue propuesta por Andersen y Kak en 1984 [60] como algoritmo que combina el ART simple y el SIRT. La definición del factor de corrección es igual que en el SIRT, pero la actualización de la imagen se realiza después del paso de todos los rayos de una determinada dirección.

2.4. Tomografía ultrasónica de transmisión

A lo largo de este capítulo se ha realizado una introducción a la tomografía y los métodos de reconstrucción de una forma general. Esta sección profundiza en conceptos directamente relacionados con la tomografía ultrasónica de transmisión, en la que se particularizan las expresiones generales dadas en secciones anteriores para el caso de los ultrasonidos.

Existen dos tipos de tomografía ultrasónica de transmisión cuya definición depende del parámetro físico de la señal ultrasónica que se mide: La tomografía de velocidad, en la que se mide el tiempo de propagación, y la tomografía de atenuación, en la que se mide la amplitud de la onda recibida.

➤ *Tomografía ultrasónica de velocidad*

Como se ha mencionado, el parámetro físico medido es el tiempo de propagación desde el transmisor al receptor. Este tiempo, t_w , es posible definirlo, tomando como base la ecuación 2.3, como la integral a lo largo de la trayectoria l , del cociente del diferencial de la trayectoria, dl , y la velocidad del medio en la trayectoria ecuación. En aplicaciones tomográficas, en vez de utilizar la velocidad de propagación, se suele utilizar su distribución espacial inversa denominada “slowness” que puede traducirse como lentitud.

$$t_{\theta}(r) = \int_{\gamma} \frac{dl}{v(l)} = \int_l slw(l)dl \quad [2.12]$$

Si el medio es discretizado en una malla de N píxeles, el tiempo de propagación del rayo m -ésimo se puede poner como:

$$t_m = \sum_{n=1}^N w_{m,n} slw_n \quad [2.13]$$

Donde slw_n , representa un pixel de la función espacial ‘slowness’, y $w_{m,n}$ representa la longitud del rayo que atraviesa el pixel.

➤ **Tomografía Ultrasónica de atenuación**

La atenuación, At , sufrida por una onda ultrasónica cuando atraviesa un material, en una primera aproximación, es posible expresarla como la relación entre la amplitud de la onda ultrasónica medida en el receptor, A_{out} , y la medida en el transmisor, A_{in} :

$$At = \frac{A_{out}}{A_{in}} \quad [2.14]$$

Por tanto, cada una de las medidas de atenuación de la onda ultrasónica, se puede expresar con una ecuación integral de trayectoria, similar a la ecuación 2.3, de la siguiente forma:

$$At_{\theta}(r) = \int_{\gamma} \alpha(l) dl \quad [2.15]$$

Es decir, la atenuación sufrida por señal a lo largo de la trayectoria l , es el producto del diferencial de la trayectoria, dl , y la función espacial de atenuación del medio que intersecta la trayectoria, representado por la función $\alpha(l)$.

Si el medio es discretizado en una malla de N pixels, la atenuación sufrida por el rayo m -ésimo se puede poner como:

$$At_m = \sum_{n=1}^N w_{m,n} \alpha_n \quad [2.16]$$

Donde α_n , representa un pixel de la función $\alpha(l)$, y $w_{m,n}$, representa la longitud del rayo que atraviesa el pixel.

2.5. Resumen del capítulo

En este capítulo se han presentado y repasado las definiciones y los conceptos básicos relacionados con las señales ultrasónicas, las imágenes ultrasónicas y la tomografía ultrasónica de transmisión.

Se han definido los fundamentos físicos de los ultrasonidos como la impedancia acústica, dispersión, modos de propagación y la atenuación, también se han presentado conceptos relacionados con la imagen acústica como son las técnicas por transmisión, pulso-eco y los tipos de imágenes ultrasónicas básicas.

Por último, se ha descrito la tomografía ultrasónica de transmisión. En ella se han presentado los fundamentos matemáticos de las dos familias de técnicas más utilizadas en la reconstrucción tomográfica de transmisión: Los métodos basados en la transformada de Radón o analíticos y los métodos algebraicos. La presentación de estas técnicas se realiza a partir del planteamiento más general del problema que utiliza la integral en línea o de trayectoria. Se ha prestado especial atención a los métodos algebraicos ya que son las técnicas de reconstrucción que son utilizadas en esta tesis, que aborda la tomografía ultrasónica. En el último apartado se ha presentado la tomografía ultrasónica de transmisión cuya definición depende del parámetro físico de la señal ultrasónica que se mide: La tomografía de velocidad, en la que se mide el tiempo de propagación, y la tomografía de atenuación, en la que se mide la amplitud de la onda recibida

3. Simulaciones numéricas

En este capítulo se realiza una descripción de la herramienta de simulación SimNDT desarrollado por el grupo de investigación G-Carma, grupo donde se ha realizado la presente tesis. Se estudia la propagación de ondas y los fenómenos de dispersión que aparecen en materiales cementicios que poseen inclusiones. Además se explica la obtención de los sinogramas a partir de las señales ultrasónicas que serán la entrada de los métodos de reconstrucción algebraica. Por último se realiza un estudio para sintonizar los principales parámetros de dichos métodos.

3.1. El simulador de propagación de ondas ultrasónicas SimNDT

Entre los problemas frecuentes que se encuentran al inspeccionar mediante ultrasonidos materiales con microestructuras complejas, están la presencia de defectos, grietas, microgrietas o, falta de homogeneidad así como otros materiales embebidos dentro del material. La falta de información y el complejo comportamiento de la propagación de los ultrasonidos en dichos materiales hacen difícil la evaluación de los mismos.

En los últimos años, se han aplicado diversos métodos en áreas específicas para lograr aportar una alta resolución en las imágenes obtenidas, especialmente para la detección y localización de orificios, conductos, grietas, y mediciones de espesores. Ejemplo de ello es la Técnica de Apertura Sintética (*SAFT*, Synthetic Aperture Focusing Technique) y las técnicas tomográficas [17-19]. Por ejemplo, Chai, H.K ha propuesto la evaluación de hormigón utilizando ondas de Rayleigh [52]. Sin embargo, todavía existe la necesidad de desarrollar sistemas adecuados para la generación de imágenes ultrasónicas que permitan evaluar el deterioro de las estructuras de hormigón.

Para superar este problema y con el objetivo de optimizar el diseño de un sistema de tomografía ultrasónica en transmisión el grupo de investigación G-CARMA ha

desarrollado un software para simulación SimNDT [68, 69] de la propagación de ondas ultrasónicas en materiales heterogéneos. El simulador permite emular tanto sistemas convencionales de inspección ultrasónica, como sistemas de tomografía ultrasónica en transmisión. El simulador se ha implementado mediante la técnica de integración finita elastodinámica (*EFIT*, Elastodynamic Finite Integration Technique) [37, 68, 70, 71], que resuelve de forma numérica la ecuación de onda elastodinámica. El software es capaz de simular de manera fiable los problemas que se presentan en la propagación de ondas en materiales dispersivos como el hormigón. En él, se simulan sistemas ultrasónicos en inmersión, proporcionando una herramienta práctica para el diseño óptimo de inspección por ultrasonidos y técnicas de reconstrucción para todo tipo de materiales.

La programación de EFIT se ha implementado mediante una plataforma estándar industrial para programación en paralelo (*OpenCL*, Open Computing Language) [72]. El simulador es capaz de generar diferentes tipos de escenarios geométricos que permiten ajustarse a la realidad que se desee inspeccionar, los resultados de la inspección realizada puede ser exportada a un fichero con formato *.mat* para ser procesados en el entorno de programación de Matlab.

Para profundizar en el estudio de la tomografía ultrasónica en transmisión como técnica de evaluación no destructiva para materiales cementicios se compararán señales sintéticas obtenidas con el simulador con las señales experimentales obtenidas en diferentes materiales.

3.1.1. Descripción general del simulador

El simulador desarrollado es una herramienta potente para el estudio de la caracterización de materiales mediante técnicas no destructivas como es la inspección ultrasónica. El simulador puede ser descrito, en dos partes:

- **Fundamentación matemática:** el simulador dispone de un motor (*core*) basado en EFIT para el modelado de la propagación de ondas en 2D en materiales elásticos y viscoelásticos. Con el fin de mejorar el rendimiento de esta técnica, se ha empleado programación en paralelo, dando opción a que se puedan utilizar microprocesadores (CPUs) multi-núcleo, así como unidades de procesamiento gráfico (GPUs) empleando OpenCL. Una

explicación más detallada del motor de la herramienta SimNDT puede consultarse en [68].

- **Interfaz gráfica de usuario:** permite la configuración de los diferentes escenarios y propiedades de los materiales, tamaño del transductor, condiciones de fronteras y los diferentes sistemas de inspección que se desee utilizar. En esta interfaz, el usuario tendrá una visualización en tiempo real de la simulación que este ejecutando. El primer paso a realizar es la creación del modelo geométrico, que será el escenario sobre el que se realizarán las inspecciones. Dicho modelo es bidimensional (2D) utilizando figuras geométricas básicas para su definición etiquetadas con diferentes valores, o en diferentes regiones. Además el simulador permite importar imágenes en diferentes formatos (jpg, bmp, png) y utilizarlas para definir el escenario. La simulación puede realizarse sobre materiales elásticos y viscoelásticos, para ello el simulador dispone de una biblioteca con diferentes materiales y sus propiedades elásticas (λ , μ) y densidades (ρ). Además se pueden agregar otros materiales introduciendo manualmente sus propiedades.

El simulador soporta diferentes técnicas de inspección como pulso-eco, transmisión, barrido lineal, barrido radial y tomografía. Un aspecto relevante de este simulador consiste en que el tiempo de procesamiento en las simulaciones es independiente de la complejidad de la microestructura, ya que solo dependerá del tamaño del modelo geométrico. Tanto si la inspección se realiza en un material con una estructura simple homogénea sencilla, como si se ejecuta en un material de estructura altamente compleja heterogénea, el tiempo de espera será el mismo mientras que se mantengan las mismas dimensiones del modelo geométrico.

Con el simulador desarrollado, se pueden estudiar diferentes configuraciones entre transductores emisores y receptores, así como también el campo de visión de los mismos. Además usando esta herramienta podrán ser validados y verificados diferentes algoritmos de reconstrucción tomográfica con el objeto de generar imágenes de un material que permitan valorar de una manera completa y no puntual las características del mismo.

3.1.2. Validación del simulador.

Con el objetivo de validar el simulador se han realizado tres pruebas. En la primera se han comparado los B-Scans de las señales obtenidas mediante simulación y medidas experimentales al inspeccionar una probeta de aluminio con agujero circular [73] (ver Figura 3.1). Estos serán utilizados para calcular los sinogramas que serán parte de los datos de entrada para los algoritmos de reconstrucción tomográfica.

La inspección tanto en simulación como experimental consistió en un transductor emisor y varios transductores receptores situados alrededor de la probeta cada 1° con respecto a la fuente, en un rango de -135° a 135° .

Figura 3.1 Comparación entre los datos simulados y experimentales.

Como se puede apreciar ambas imágenes son muy similares, la posición del eco y de la amplitud coinciden. Las diferencias que pueden observarse son debidas a que la señal de entrada utilizada como fuente en la simulación difiere de la señal de excitación real, no obstante, el comportamiento general puede apreciarse que es similar.

La segunda prueba consiste en un barrido radial en transmisión en inmersión de una probeta cilíndrica de aluminio (obsérvese Figura 3.2), con cuatro taladros de diferente profundidad, por lo que en dependencia de la cota seleccionada, se verán 0, 1, 2, 3 o 4 taladros. En este caso se comparan los B-Scan obtenidos de las señales reales y simuladas.

Figura 3.2 Imágenes de la probeta de aluminio sin y con agujeros simulada y real.

Para la inspección de las probetas reales, se ha utilizado un sistema portátil de inspección ultrasónica para probetas cilíndricas, IMAUSHOR,[74] (PCT/ES2011/070499). El sistema realiza dos movimientos diferentes, una rotación centrada en el eje del cilindro y un movimiento vertical. A partir de los A-scan recibidos es posible construir las imágenes B-scan midiendo la amplitud y el tiempo de vuelo en cada uno de ellos y generando mapas de velocidad y atenuación, una explicación detallada de este sistema se puede encontrar en el próximo capítulo.

Figura 3.3 Imágenes diametrales en probeta de aluminio a) señales simuladas b) señales reales.

En la Figura 3.3 se muestra la transmisión diametral a través de la probeta [75]. El eje X representa la posición en grados del transductor alrededor del diámetro, el falso color

indica la información de amplitud, el azul corresponde a la señal que se propaga en el agua y el resto corresponde a la señal a través del aluminio.

Debido al movimiento de rotación, las señales son simétricas con respecto al eje Y. Ambas imágenes fueron obtenidas bajo los mismos parámetros y condiciones de inspección a fin de realizar una comparativa correcta.

Los resultados obtenidos muestran que hay mucha similitud entre ambas imágenes. Tanto la posición de los defectos como la amplitud están en perfecta correspondencia tanto en las señales simuladas 3.3 a) como las obtenidas experimentalmente 3.3 b).

Figura 3.4 Imágenes de la probeta de hormigón simuladas a) microestructura con tubos de PVC, b) con barras de aluminio, c) con barras de acero y d) probetas reales fabricadas.

La tercera prueba consiste en el mismo barrido radial en transmisión en inmersión, pero esta vez de tres probetas cilíndricas de hormigón de ($\varnothing$ 150 mm) con tres inclusiones circulares situados a la mitad del radio, véase Figura 3.4.

En estas simulaciones el diámetro de los defectos es el mismo de ($\varnothing$ 20 mm) y los materiales utilizados fueron tubos de PVC, barras de aluminio y barras de acero.

Desde la Figura 3.5 hasta la Figura 3.7 se muestran las imágenes radiales tanto simuladas como reales de las probetas de hormigón con 1, 2 y 3 inclusiones con los distintos materiales seleccionados. Las imágenes radiales son simetrías con respecto al eje X.

Figura 3.5 Imágenes radiales de la probeta de hormigón con tubos de PVC: a, b, c) simulación y d, e, f) señales reales obtenida con el sistema de tomografía

La presencia de las barras en las zonas donde están colocados provoca una disminución de la amplitud de las señales ultrasónicas en todas las figuras. Se puede observar una zona en *a)* dos zonas iguales en *b)* y dos zonas más anchas en *c)*. La zona más ancha corresponde a la presencia de dos barras alineadas.

Figura 3.6 Imágenes radiales de la probeta de hormigón con defecto aluminio: a, b, c) simulación y d, e, f) señales reales obtenida con el sistema de tomografía

Aunque el comportamiento de la amplitud es similar en todos los casos, se pueden observar varias diferencias. La disminución de la amplitud debida al efecto que provoca el tubo de PVC es mayor que el que provoca el defecto de aluminio debido a la gran diferencia de impedancia acústica entre estos materiales y el hormigón.

En todos los casos, se puede observar que las imágenes simuladas e inspeccionadas coinciden, la amplitud y las posiciones de los defectos son similares

Figura 3.7 Imágenes radiales probeta de hormigón con barras de acero: a, b, c) simulación y d, e, f) señales reales obtenida con el sistema de tomografía.

De manera que se puede afirmar que el SimNDT es una herramienta muy útil para el estudio de la propagación de las ondas ultrasónicas para todo tipo de materiales, especialmente ayudará al estudio de la tomografía ultrasónica en aquellos materiales heterogéneos y dispersivos como es el hormigón.

3.1.3. Propagación de ondas

Para el estudio de la propagación de las ondas se muestran varios ejemplos simulados tanto para materiales homogéneos pocos dispersivos como el aluminio, así como materiales heterogéneos muy dispersivos como el hormigón.

El primer ejemplo se muestra en la Figura 3.8, en esta se presentan tres escenarios de simulación, en los que se ha realizado una inspección ultrasónica en transmisión.

El escenario consta de diferentes regiones, una probeta de aluminio sumergida y centrada en un tanque de agua, el círculo azul representa la probeta y el cuadrado azul oscuro el tanque de agua. Como es una representación en 2D se supone que la altura de la probeta y del tanque es infinita.

Los círculos más pequeños dentro de la probeta son los que se ha designado como agujeros, el color azul oscuro para un agujero relleno con agua y el de color verde para un agujero con aire. Se ha utilizado el color rojo para simular las condiciones de frontera, para este caso se han elegido condiciones definidas como aire.

Figura 3.8 Diferentes escenarios para inspeccionar

En la Figura 3.9 se puede apreciar diferentes instantes en la simulación de la propagación de ondas ultrasónicas en diferentes escenarios. Un único transductor hace de emisor, para ello se discretiza la superficie donde se coloca el transductor como una línea de puntos, donde la señal de excitación aplicada a cada punto tiene como perfil un pulso sinusoidal gaussiano. Por el principio de Huygens, en cada punto se generará una fuente esférica puntual, y la suma de la respuesta de cada uno de los puntos generará un frente de onda.

a)Aluminio sin agujeros b)Agujero relleno con agua c)Agujero relleno con aire

Figura 3.9 Diferentes instantes en simulación para una probeta de aluminio a) sin agujero, b) con un agujero relleno con agua, c) con un agujero relleno con aire.

Se puede observar como la señal ultrasónica simulada se propaga visiblemente a lo largo de todo el material poco dispersivo como es el aluminio. En este caso se observa la formación de los frentes de onda y el comportamiento a su paso a través del material, la formación y aparición de reflexiones y difracciones. Al estar sumergida en agua, se observa claramente la formación de las ondas longitudinales y los modos de conversión en las superficies límites dentro de la probeta.

Se puede apreciar como el pulso ultrasónico emitido por el transductor “ilumina” el agujero saturado con agua, y no se propaga en el agujero relleno con aire, lo bordea, esto es debido a la gran diferencia de impedancia acústica entre el aluminio y el agua.

Otro ejemplo se muestra en la Figura 3.10, donde se observa las simulaciones de la propagación del pulso ultrasónico en una piedra caliza con y sin inclusión de acero[75].

Figura 3.10 Diferentes instantes en simulación de la propagación de la onda ultrasónica en a) piedra caliza sin inclusión y b) piedra caliza con inclusión acero

Tal y como se muestra en las imágenes puede observarse la creación y el avance del frente de onda, la transmisión y la reflexión de las ondas en las superficies de contorno del disco de piedra caliza. Véase como la presencia de la pieza de acero dentro de la piedra modifica la propagación del frente de onda y reduce la amplitud de la onda recibida.

En la Figuras 3.11 se muestran diferentes simulaciones relacionadas con la tomografía. Las líneas negras espaciadas alrededor de la probeta equivalen y sustituyen a anillo circular de transductores con los que se realiza la simulación de inspección de

tomografía ultrasónica en transmisión. En este ejemplo se ha asumido un anillo circular de transductores donde un único transductor emite solo una vez y los demás reciben la señal ultrasónica simulada que se propaga a lo largo del material.

Se presentan las simulaciones de la propagación ultrasónica en un modelo geométrico de hormigón con un agujero (tanto saturado con agua como relleno de aire). Este caso corresponde a un material altamente heterogéneo y dispersivo, por lo cual no se observa que el pulso ultrasónico “ilumina” al agujero con agua. Solamente puede verse para el caso en que el agujero está relleno de aire. De igual forma que en la probeta de aluminio, el pulso ultrasónico no viaja a través del agujero debido a los grandes cambios de impedancia acústica [76]. Ya en estas imágenes al ser un material tan dispersivo, no se observa tan claramente el frente de onda. Este, se ha difuminado, debido a la atenuación, las interferencias y los modos de conversión de ondas, el resultado es una imagen de campo acústico mucho menos definida que en el caso de la probeta de aluminio.

Figura 3.11 Simulación de la propagación de una onda ultrasónica en hormigón a diferentes instantes de tiempo con diferentes agujeros a) agua y b) aire

El último ejemplo se muestra en la Figura 3.5 diferentes instantes de la propagación de las ondas ultrasónicas se presentan en tres escenarios diferentes.

Material	Densidad (kg/m ³)	V _l (m/s)	V _t (m/s)
Pasta de Cemento	2300	4099.31	2295.55
Agregados	2600	5721.25	3282.24
Aire	1.24	340	
Agua	1000	1480	
Aluminio	2720	6320	3772
Acero	7800	5850	3220
PVC	1400	2381	1045
Tabla 3.1 Propiedades de los materiales utilizados en la simulación			

Los escenarios diseñados son microestructuras con un modelo bidimensional, representando una probeta de hormigón circular de ($\varnothing$ 150 mm) sumergida en agua ocupando un área de 250 x 250 mm. La probeta de hormigón fue modelada como un material trifásico (matriz de cemento, agregados y vacíos de aire) con barras incrustadas de diferentes tamaños y materiales (tubos de PVC, barras de aluminio y barras de acero). Las propiedades de los materiales utilizados en las simulaciones se describen en la Tabla 3.1.

En la Tabla 3.2 se muestran los diferentes diámetros de las barras utilizadas en la simulación

	Inclusion 1	Inclusion 2	Inclusion 3
Microestructura + tubos de PVC	20 mm	25 mm	32 mm
Microestructura+ barras de Aluminio	16 mm	22 mm	30 mm
Microestructura + barras de Acero	16 mm	19.5 mm	28 mm
Tabla 3.2 Diámetros de los defectos			

Para las inspecciones se utilizó un anillo de ($\varnothing$ 240 mm) con 119 transductores separados 3°, funcionando en modo de transmisión. Los transductores (que tienen $\varnothing$ 25 mm) emiten un pulso sinusoidal gaussiano de 4 ciclos a 500 kHz, ver Figura 3.12.

Figura 3.12 Parámetros utilizados en la inspección

Se puede observar como la onda ultrasónica se va propagando uniformemente en el agua hasta alcanzar el hormigón que es heterogéneo, esto provoca que la energía acústica sea reflejada y difractada. Puede observarse la deformación del frente de onda, dependiendo de las propiedades físicas como densidad y velocidad ultrasónica de los materiales de las barras utilizadas. Los defectos introducidos modifican al frente de onda antes de alcanzar a los receptores en lado opuesto del emisor. En el caso del hormigón con tubos de PVC esta modificación está más acentuada, se puede observar claramente las sombras de los 3 defectos en el campo acústico.

Figura 3.13 Instantáneas de la propagación de las ondas ultrasónicas

La presencia de los defectos provoca una variación en la amplitud, se aprecia como las ondas ultrasónicas pueden pasar por los defectos de aluminio, ya que la impedancia acústica de los agregados es similar, véase Tabla 3.1, sin embargo el pulso ultrasónico no se propaga por los defectos de tubos de PVC debido a la gran variación de impedancia acústica.

Figura 3.14 Ejemplo de proyecciones cuando emiten cada uno de los transductores

En el ejemplo mostrado en la Figura 3.14 se ha realizado la simulación con un ángulo de inspección de 45 grados, lo que significa que se tendría un anillo con 8 emisores y 7 receptores. A medida que se seleccionen ángulos más pequeños, implicará mayor número de transductores por lo que se cubrirá un mayor número de proyecciones.

La salida del simulador son las correspondientes señales ultrasónicas. A partir de dichas señales se va a calcular el sinograma. Este sinograma es la entrada de los métodos de reconstrucción que se han estudiado y que tienen como resultado la imagen reconstruida.

3.2. De las señales simuladas al sinograma

A partir de las señales que se han generado con el simulador, es necesario construir los sinogramas, tanto el de tiempo de vuelo como el de amplitud, donde cada una de las columnas corresponderá a la información obtenida de cada B-scan, por consiguiente se tendrán tantas columnas como posiciones del emisor con respecto a la probeta y tantas filas como posiciones relativas del receptor con respecto al emisor.

Para el cálculo de los sinogramas, en primer lugar se detecta el tiempo de propagación mediante la técnica de detección del primer cruce por cero [77] y a continuación se determina el máximo de una ventana temporal centrada en dicho punto, con el objetivo de quedarse solamente con la amplitud de los primeros ciclos de la señal y evitar en lo posible interferencias debidas a los elementos dispersivos.

La Figura 3.15 es una gráfica que contiene todas las señales que reciben los receptores para un único ángulo del transmisor (imagen B-Scan) en simulación.

Figura 3.15 Ejemplo de imagen B-scan

Como se observa en dicha figura, en las primeras y últimas señales (que son los ángulos del receptor cercanos al transmisor) la propagación de la onda ultrasónica es superficial y no aporta información sobre el interior del material, por lo tanto deben ser desechadas.

Este fenómeno es el que da lugar a lo que denominamos ángulo ciego que se explicara a continuación.

3.2.1. Ángulo ciego

El ángulo ciego es el mínimo ángulo que hay entre el transmisor y el receptor. Este viene delimitado por las restricciones físicas del tomógrafo y por las reflexiones y la naturaleza de los modos de conversión de la propagación de las ondas ultrasónicas, ya que cuando el transmisor y el receptor se encuentran muy juntos, la propagación de las ondas es superficial y no aporta información sobre el interior del material, degradando la calidad de la imagen.

Figura 3.16 a) Sin restricción y b) Con ángulo ciego de 75° .

En la Figura 3.16 se muestra un ejemplo del uso del ángulo ciego, en la 3.16 a se puede observar el caso de una inspección sin ninguna restricción, y en la 3.16 b se puede ver como sería aplicando un ángulo ciego de 75° ; se puede apreciar que para cada posición del emisor, los receptores adyacentes no reciben información, se forman muescas alrededor del círculo.

3.2.2. Cálculo de los sinogramas

A partir de los sinogramas, es posible generar imágenes tomográficas, tanto de velocidades como de amplitudes. En la primera, la imagen muestra la distribución de las velocidades dentro del material inspeccionado, mientras que el segundo muestra la distribución de las amplitudes.

En un material, la velocidad del sonido está directamente relacionada con la elasticidad y densidad del mismo. La presencia de defectos en el material, provocará una variación de la velocidad de la onda y, consecuentemente, en el instante de llegada. Para construir el sinograma de velocidades hay que calcular la velocidad para cada una de las posiciones transmisor-receptor, y a partir de este, reconstruir la imagen con dicha información.

Para calcular la velocidad, es necesario estimar el instante de llegada del primer rayo de la onda ultrasónica. Si se denomina n_W a la muestra en la que se considera que llega este primer rayo, el tiempo de propagación t_W , es:

$$t_W = n_W \cdot T_S \quad [3.1]$$

Donde T_S es el periodo de muestreo.

Para calcular la velocidad, una vez conocido el tiempo de propagación y las dimensiones del material inspeccionado, es:

$$v = \frac{s}{t_W} \quad [3.2]$$

Donde s es la distancia recorrida por la señal ultrasónica, que depende de las posiciones del transmisor y receptor. Las ecuaciones 3.1 y 3.2, y la Figura 3.10 muestran el cálculo de esta distancia cuando el transmisor y receptor forman un ángulo α (que es la información que nos proporciona el simulador).

Figura 3.17 Cálculo de la distancia entre el transmisor y el receptor

$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{s/2}{r} \quad [3.3]$$

$$s = 2 \cdot r \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad [3.4]$$

Para cada una de las señales generadas por el simulador y por el tomógrafo, el cálculo de la velocidad proporciona un punto del sinograma de velocidades. Para calcular el sinograma completo es necesario procesar todas las señales.

Como ya se ha mencionado, el otro tipo de tomografía que se obtiene es la tomografía de amplitudes. A medida que la onda ultrasónica atraviesa el material, la energía del sonido se absorbe o dispersa dependiendo de las características del material. Esta variación depende de la densidad, dureza, viscosidad y de la estructura molecular del material, así como de la frecuencia de la señal ultrasónica. La presencia de defectos en el material, provoca una variación en la amplitud de la onda respecto a cuándo hay ausencia de defectos, incrementándose su atenuación.

Para construir este sinograma de amplitudes, se calcula el máximo valor de la señal ultrasónica desde el instante de llegada del primer rayo t_W hasta $t_W + T_0/2$.

$$A = \max\left\{x(t_W) : x\left(t_W + \frac{T_0}{2}\right)\right\} \quad [3.5]$$

Donde A es la amplitud máxima, $x(t)$ es la señal ultrasónica y T_0 es el inverso de la frecuencia central del transductor. Este cálculo nos proporciona un punto del sinograma

de amplitudes, para calcular el sinograma completo es necesario procesar todas las señales.

3.2.3. Estimación del instante de llegada

El punto crítico, tanto para calcular la velocidad como la amplitud, es la estimación del instante de llegada del primer rayo de la señal recibida. En este apartado se explica cómo se calcula este instante.

Se han analizado diversas técnicas para la estimación del instante de llegada. Las técnicas basadas en la correlación no han funcionado debido a que, en la señal recibida, no es posible resolver los diferentes rayos que han recorrido los diferentes caminos para llegar al receptor. Por otra parte, en general los materiales que se van a inspeccionar no son homogéneos, por lo que la señal sufre un fenómeno de dispersión que la deforma tanto en amplitud como en fase.

Figura 3.18 Cálculo de la muestra de llegada na

Debido a estos condicionantes, hemos comprobado que las técnicas que han tenido más éxito son las basadas en la definición de umbral.

En la Figura 3.18 se muestran los principales pasos del método que se ha utilizado. Este algoritmo se basa en la definición de un umbral.

En el primer paso, tras un pre procesamiento que entre otras cosas hace la media nula y normaliza la señal respecto al valor máximo, se calcula el valor absoluto de la señal. A continuación, se resta a esta señal el umbral (Figura 3.18 b). Posteriormente, se busca la primera muestra de la señal que sobrepasa dicho umbral (Figura 3.18 c). Una vez obtenida dicha muestra, se va hacia atrás hasta encontrar el primer valor negativo de la señal y se aplica interpolación lineal entre dicha muestra y la siguiente para hallar el instante de llegada (Figura 3.18d). Esta muestra se corresponde con lo que se ha denominado como n_a .

Debido al ruido, es posible que el primer máximo esté enmascarado y con este método se detecta al segundo. Este método, por tanto, puede tener un error de $\lambda/2$.

3.2.4. Sinogramas

A continuación se va a mostrar un ejemplo de sinograma de amplitud y velocidad para un material no homogéneo (microestructura de hormigón y agua) que tiene como inclusión un tubo de PVC.

En la Figura 3.19 se muestra el escenario simulado junto con los sinogramas de velocidad y de amplitud obtenidos.

Figura 3.19 Ejemplos de sinogramas de velocidades y de amplitudes

En ambos casos se observa una figura sinusoidal (de ahí su denominación como sinograma). En dichas figuras se puede observar que el sinograma de amplitudes tiene

mucho más contraste que el de velocidades y permitirá ver los defectos en la imagen reconstruida con mayor calidad.

3.3. Sintonización de parámetros en los métodos de reconstrucción algebraica

En este apartado se van a estudiar los principales parámetros que intervienen en los métodos de reconstrucción algebraica.

Para realizar estas simulaciones, se ha realizado un programa en Matlab que consta de las siguientes partes, que se resumen en la Figura 3.20:

- 1- Generación de la imagen que se va a reconstruir f , de dimensión N. De esta forma conocemos la solución a la que debe converger el método de reconstrucción. Se ha decidido que las imágenes tengan una dimensión fija, de $N=80 \times 80$, que va a corresponder físicamente con una imagen de 15×15 cm.
- 2- Obtención de la matriz de pesos del tomógrafo W , de dimensión $M \times N$, donde M es el número de rayos y N es la dimensión de la imagen. La matriz de pesos depende enteramente de los parámetros físicos del tomógrafo
- 3- Obtención del sinograma, $p = Wf$, que es la entrada del método de reconstrucción algebraica.
- 4- Aplicación del algoritmo de reconstrucción algebraica, que como ya se ha comentado es el método SIRT. De esta forma se obtiene la imagen reconstruida, $\hat{f}$.
- 5- Medida de la calidad de la imagen reconstruida.

Figura 3.20 Diagrama de bloques

Los parámetros que se van a estudiar están directamente relacionados con los parámetros físicos del tomógrafo. Son los siguientes:

- Anchura del haz
- Número de posiciones del transmisor
- Número de posiciones del receptor
- Ángulo ciego

Para medir las prestaciones de las imágenes reconstruidas se han definido un conjunto de criterios:

- Error cuadrático medio, E_{cm} : se define como el promedio de los errores al cuadrado dividido por el número de píxeles.

$$E_{cm} = \frac{\|f - \hat{f}\|^2}{N} \quad [3.6]$$

- Error máximo, E_{max} : es la máxima diferencia entre la imagen real y la reconstruida.

$$E_{max} = \max (abs(f - \hat{f})) \quad [3.7]$$

Para estudiar los parámetros se han utilizado cuatro imágenes de test que permitirán sintonizar el algoritmo de reconstrucción.

Las imágenes utilizadas son: imagen uniforme (Figura 3.21 a), imagen con un defecto Ø3 cm (Figura 3.21 b), imagen con dos defectos, Ø 2.5 y Ø 3 (Figura 3.21 c), e imagen con tres defectos, Ø 2, Ø 2.5 y Ø 3 cm (Figura 3.21 d).

Figura 3.21 Imágenes test utilizadas

En todas las simulaciones se va a modificar un sólo parámetro dejando el resto con sus valores por defecto. Tras realizar algunas pruebas se ha decidido que estos valores sean: anchura de haz=3cm, número de posiciones del transmisor/receptor=85 (cada 4°) y ángulo ciego=4°.

3.3.1. Anchura del haz

La anchura del haz está relacionada con el ancho del transmisor ultrasónico. Con el fin de evaluar el método de reconstrucción, el ancho del haz es un compromiso entre la información de la imagen contenida en el sinograma p (si es demasiado estrecho, se pierde información de la imagen), y la resolución (si es demasiado ancho impide ver separados defectos muy cercanos). En esta simulación se modifica el ancho del haz desde 0,25 cm hasta 8 cm dejando el resto de parámetros fijos e iguales a 4 grados.

Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

Figura 3.22 Error cuadrático medio con respecto a la anchura del haz

Figura 3.23 Error máximo con respecto a la anchura del haz

De la Figura 3.22 y 3.23 se puede deducir que, tanto el error cuadrático medio como el error máximo, toman valores muy altos cuando el ancho del haz es menor de 1 cm, y que estos errores se estabilizan entre 2 y 3 cm. El valor que se va a considerar, debido a los resultados de este apartado, es de 2 cm.

3.3.2. Número de posiciones del transmisor

El número de posiciones del transmisor es un parámetro crítico y está relacionado con la información que contiene el sinograma de la imagen que se quiere reconstruir. Minimizar el número de posiciones del transmisor es muy interesante no sólo para reducir el número de ecuaciones y, por tanto, incrementar la velocidad del algoritmo, sino también facilitar la inspección tomográfica, ya que no siempre va a ser posible acceder a todos los puntos de un objeto del cual se quiere realizar la reconstrucción.

El principal parámetro que se ve afectado por el número de posiciones del transmisor y del receptor es el número de ecuaciones que se tendrán que resolver:

$$M = N_{Medidas\ TX} \cdot N_{Medidas\ RX} \quad [3.8]$$

Por ejemplo, si el número de posiciones del transmisor son 120 y las del receptor son 90, el número de ecuaciones totales será de $120 \cdot 90 = 10800$ y, ya que el número de píxeles es fijo e igual a 80×80 , el número de incógnitas será de $N = 6400$.

Figura 3.24 Error cuadrático medio con respecto al número de medidas del transmisor

Figura 3.25 Error máximo respecto al número de medidas del transmisor

Las Figuras 3.24 y 3.25 muestran como varía el error cuadrático medio y error máximo cuando el paso de ángulo del transmisor varía entre 1° y 50° , que corresponden a disminuir desde 360 a 7 posiciones.

De las anteriores gráficas se puede deducir que, tanto el error cuadrático medio como el error máximo, crecen a partir de un paso de ángulo entre medidas del transmisor de 5 a 7° . Un valor razonable para el paso del transmisor, por lo tanto, estará entre 1° y 7° . A partir de estos resultados, el valor que se va a tomar a partir de ahora es 5° .

3.3.3. Número de posiciones del receptor

Al igual que el número de posiciones del transmisor, el número de posiciones del receptor está relacionado con la información que contiene el sinograma de la imagen a reconstruir.

Figura 3.26 Error cuadrático medio con respecto al número de medidas del receptor

Figura 3.27 Error máximo respecto al número de medidas del receptor

Las Figuras 3.26 y 3.27 muestran cómo varía el error cuadrático medio y error máximo.

De las anteriores gráficas se puede deducir que, al igual que en el paso del transmisor, el error cuadrático medio y el error máximo crecen a partir de $7/8^\circ$. El valor que se va a considerar a partir de ahora es un valor intermedio, 5° .

3.3.4. Variación del ángulo ciego

El ángulo ciego es el mínimo ángulo que hay entre el transmisor y el receptor. Este viene delimitado por las restricciones físicas del tomógrafo y por la naturaleza de los modos de propagación de las ondas ultrasónicas, ya que cuando el transmisor y el receptor se encuentran muy juntos, la propagación de las ondas es superficial y no aporta información sobre el interior del material, degradando la calidad de la imagen. Este parámetro conviene estudiarlo porque va a ser un parámetro crítico en los siguientes capítulos, cuando trabajemos con señales simuladas y reales.

Los parámetros que se van a utilizar en esta simulación son los que se han definido por defecto al inicio de este apartado, es decir, tanto el transmisor como el receptor toman medidas cada 4 grados. Lógicamente, cuanto menor sea el ángulo ciego, menor es el número de medidas del receptor que se pierden y mejor será la calidad de la imagen reconstruida. Sin embargo, en la práctica es muy difícil conseguir valores de ángulo ciego muy bajos.

Figura 3.28 Error cuadrático medio con respecto al ángulo ciego

Figura 3.29 Error máximo con respecto al ángulo ciego

Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 3.28 y 3.29. El error cuadrático medio y error máximo permanecen prácticamente constantes hasta los 70 grados de ángulo ciego. A partir de dicho ángulo el error crece exponencialmente. Tanto en las señales simuladas como en las reales de los siguientes capítulos, el ángulo ciego va a estar entre 70 y 100°.

3.4. Resumen del capítulo

En este capítulo se ha presentado y explicado el simulador SimNDT. Se ha realizado una comparación de señales sintéticas obtenidas con el simulador con señales experimentales. Se ha mostrado que es una herramienta muy útil para el estudio de la propagación de las ondas ultrasónicas para materiales cementicios.

También se han analizado los parámetros principales que permiten sintonizar al algoritmo de reconstrucción y que están directamente relacionados con los parámetros físicos del tomógrafo. A partir de los resultados obtenidos, se ha decidido que el valor

de dichos parámetros es: anchura del haz=2cm, número de posiciones del transmisor/receptor=72 (salto de ángulo de 5°) y ángulo ciego=70°. Estos parámetros permiten la reconstrucción tomográfica en una primera aproximación. La selección final de los parámetros va a depender de las características físicas del tomógrafo y del material inspeccionado.

4. Diseño experimental

En este capítulo se presenta el montaje experimental. Primeramente se describe el sistema de tomografía ultrasónica en transmisión para probetas con simetría cilíndrica “IMAUSHOR” que ha sido utilizado para obtener las señales experimentales. Este sistema es una de las aportaciones de esta tesis. Seguidamente se muestran el conjunto de probetas con barras/tubos embebidos de diferentes tamaños y materiales que serán inspeccionados, para finalizar detallando el procedimiento así como los parámetros utilizados en las inspecciones.

4.1. Sistema de tomografía ultrasónica para probetas con simetría cilíndrica IMAUSHOR

La evaluación de estructuras de hormigón y materiales cementicios mediante imágenes ultrasónicas se muestra como una solución interesante debido a su bajo coste y portabilidad, pero, no es ni directo ni evidente el diseño de un equipo que reúna los requerimientos necesarios para ofrecer imágenes que nos brinden la calidad y el estado de deterioro en probetas de hormigón. Las normas existentes para la evaluación en este campo se limitan a la medida manual y puntual de la velocidad ultrasónica [78, 79]. Así, la falta de automatización, conlleva a que sea limitado el número de medidas, haciendo muy costosa o poca atractiva la obtención de las imágenes. El sistema que a continuación se describe, ha sido diseñado por la motivación de contar con un sistema portátil. Entre los requisitos de este sistema está el ser de bajo coste y proporcionar información tanto de la calidad como del estado de deterioro de probetas y/o testigos cilíndricos de hormigón o de cualquier otro material.

El sistema propuesto permite realizar imágenes diametrales y tomografía ultrasónica en transmisión, en inmersión. El sistema ha sido patentado “Sistema portátil de ensayos no destructivos de probetas con simetría axial de materiales cementicios por imagen

ultrasónica y procedimiento asociado. IMAUSHOR” (PCT/ES2011/070499)[74]. Diferentes prototipos han sido desarrollados previos a la versión definitiva que se expone en este trabajo.

El sistema para imágenes diametral ha sido utilizado para caracterizar el deterioro del hormigón en diferentes procesos de degradación, como los ciclos de hielo-deshielo, ataque por cloro o sulfato entre otros[80, 81]. Los prototipos del sistema de tomografía en transmisión se han utilizado para estudiar las configuraciones de emisión/receptor [73, 82], y en la detección de defectos en probetas de aluminio y de hormigón[76].

El sistema se encuentra en fase de prueba para su posible comercialización.

4.1.1. Descripción general del tomógrafo

El sistema tomográfico en transmisión consta de dos partes (ver Figura 4.1):

- *Sistema de Inspección*, formado por dos subsistemas, el mecánico y el electrónico.
- *Sistema de generación de imagen ultrasónica*, formado por dos subsistemas, el subsistema de emisión-recepción y adquisición de señales ultrasónicas (SUS) y el sistema de inspección tomográfica (*Ultrasonic Tomographic System Inspection*) encargado del procesamiento y almacenamiento digital de la información (UTIS).

Figura 4.1 Esquema del sistema tomográfico desarrollado.

El sistema de inspección posee dos transductores de manera que un haz ultrasónico atraviesa cada una de las cuerdas de la probeta cilíndrica. La excitación de los

transductores y la adquisición de la señal ultrasónica que se ha propagado a través de la probeta son realizadas por el subsistema SUS sincronizado convenientemente con el sistema de inspección. Las señales ultrasónicas adquiridas se envían al UTIS que es el encargado de extraer y representar mediante imágenes la información obtenida.

4.1.2. Sistema de inspección

El sistema de inspección, consta de un subsistema de barrido mecánico y un subsistema electrónico.

Subsistema de barrido mecánico

El subsistema de barrido mecánico está formado por una estructura resistente a la inmersión en líquidos, porque gran parte de ella se sumerge en una cubeta llena de agua u otro líquido que servirá de acoplante ultrasónico. Esta estructura está formada por dos subestructuras, la primera como se muestra en la Figura. 4.2, consta fundamentalmente de una plataforma giratoria y un tornillo sin fin donde se acopla un brazo en forma de U. Este subsistema, mediante un motor acoplado al tornillo sin fin, permite generar simultáneamente un movimiento de rotación de la plataforma donde estará situada la probeta y un movimiento vertical del brazo a lo largo de la altura de la probeta.

Figura 4.2 Subestructura 1 del subsistema de barrido mecánico

La segunda subestructura, como se observa en la Figura 4.3, es una estructura en forma de anillo que está soportado por el brazo en forma de U de la subestructura anterior. Mediante la incorporación de un segundo motor, sirve de guía para el movimiento circular de los transductores ultrasónicos con los que se realiza la inspección y variar, por tanto, la posición relativa entre el transductor emisor y el receptor. Uno de los transductores, el emisor, permanece fijo en el anillo y el otro se moverá a lo largo del anillo en las diferentes posiciones. Cuando estos están enfrentados se detectará el mayor pulso ultrasónico que atraviesa la probeta.

Figura 4.3 Subestructura 2 del subsistema de barrido mecánico

Con esta subestructura se pueden realizar inspecciones tomográficas de probetas cilíndricas de manera sencilla y evitando la necesidad de utilizar un anillo de transductores ya que sólo se utilizan dos transductores, dos motores y se aprovecha el giro de la probeta conseguido mediante el tornillo sin fin. Por tanto, con el cambio de las posiciones relativas de los transductores en el anillo se obtienen los “rayos” de diferentes trayectorias tal como se muestra en la Figura 4.4. El movimiento de rotación de la probeta permite cambiar la posición del emisor a lo largo de la superficie de la probeta, y por último el movimiento vertical permite tener la tomografía a diferentes alturas de la probeta.

Figura 4.4 Emisión - recepción de un pulso electrónico en forma de haz

Subsistema electrónico

El subsistema electrónico (ver Figura 4.5) por una parte, coordina el movimiento de los transductores con relación a la probeta a inspeccionar, y por otra, genera una señal de sincronismo asociada a la posición relativa de los transductores. Esta posición será enviada al sistema de generación de imagen ultrasónica, y más concretamente, a los subsistemas de emisión - recepción y adquisición de señales ultrasónicas, para que genere un pulso ultrasónico.

El control de los dos motores que generan el movimiento del sistema se realiza de manera análoga. El controlador va conectado por USB al PC que contiene el subsistema UTIS. El sistema de control se ha implementado sobre la plataforma de código abierto Arduino (UNO) [83], y se ha utilizado una librería especializada de Arduino, facilitando la programación de los mismos. Cada uno de los motores lleva asociado dos fines de carrera y un decodificador de posición (o vueltas). En el caso del motor 1, que proporciona el giro de la probeta y el movimiento vertical del anillo, los dos fines de carrera son accionados por el brazo móvil y delimitan así su movimiento vertical. El decodificador de posición proporciona información, tanto de la posición de giro de la probeta, como de la vertical del anillo. En el caso del motor 2, los fines de carrera que están acoplados al anillo son accionados por el sistema de sujeción del transductor móvil y delimitan su movimiento de traslación. El decodificador de posición del motor proporciona la posición del transductor móvil, y sirve para coordinar y sincronizar el

movimiento relativo de los transductores respecto a la probeta con la emisión y adquisición de las señales ultrasónicas. Asimismo, el subsistema electrónico incorpora un teclado que permite al operario introducir órdenes al controlador de movimiento de manera manual para situar los transductores en una posición determinada o girar la probeta.

Figura 4.5 Diagrama de bloques del subsistema electrónico

El UTIS envía un comando con la siguiente información mínima a través del USB para que el controlador ejecute:

- Inicio y fin de la inspección.
- Sincronización con el SUS.
- Sentido de los diferentes movimientos.

4.1.3. Sistema de generación de la imagen ultrasónica

El sistema de generación de imagen ultrasónica está compuesto de un subsistema de emisión-recepción, adquisición y procesamiento de señales ultrasónicas, así como el almacenamiento digital de la información ultrasónica adquirida. Todos estos sistemas,

están conectados a través del puerto USB al PC y se ejecutan a través de un software propio de inspección.

Subsistema de emisión-recepción y adquisición de señales ultrasónicas (SUS)

Se han utilizado dos transductores modelo V413 de Olympus como se muestra en la Figura 4.6, son transductores rectangulares de 500Khz y banda ancha, los cuales mecánicamente son muy adecuados para su incorporación al sistema.

Figura 4.6 Transductores v413 de Olympus

La excitación electrónica y la adquisición de los pulsos ultrasónicos han sido implementados a través de un sistema comercial de emisión/recepción de ultrasonido marca Ultratek modelo USB-UT350 (*Portable Ultrasonic Pulser/Receiver and Analog to Digital Converter*) (véase Figura 4.7). Las características y especificaciones del mismo pueden encontrarse en [84].

Figura 4.7 Sistema de emisión/recepción de ultrasonido ultratek modelo usb-ut350

Subsistema de procesamiento y almacenamiento digital de la información (UTIS).

Para modificar las diferentes variables de inspección, y establecer la comunicación con el usuario, el grupo de investigación ha diseñado e implementado un software para la inspección de las probetas o piezas llamado (UTIS). Este software permite el manejo del sistema electrónico de control, adquisición y almacenamiento de las señales. Cuenta con una interfaz gráfica muy amigable y de fácil manipulación para el usuario. El subsistema consta de medios de procesamiento y almacenamiento digital de información que procesan las señales adquiridas por los subsistemas de emisión-recepción.

➤ El procedimiento para la inspección ultrasónica es el siguiente:

- 1- Se programan todos los parámetros de control de motores, barrido de la inspección y de adquisición y procesamiento de la señal ultrasónica.
- 2- Se sitúa la probeta en la plataforma de giro y una vez situado el anillo en la cota de la probeta donde se desea realizar una tomografía axial, se sitúa el transductor móvil en uno de los extremos del anillo marcados por los fines de carrera. Se inicia el movimiento en sentido horario u anti horario dependiendo de su posición inicial. Cuando este movimiento finaliza, detectado por el fin de carrera final, se realiza un movimiento rotacional de la probeta un ángulo determinado que se obtiene mediante el decodificador de posición, se detiene el movimiento rotacional y se inicia de nuevo el movimiento del transductor móvil en el sentido contrario al del movimiento anterior. Así sucesivamente hasta que al menos se ha completado una rotación de 360°.
- 3- Con el movimiento sincronizado, rotacional en la probeta y vertical del brazo, el controlador de movimiento genera una señal de sincronismo que permite se emita un pulso ultrasónico que atraviesa la probeta cilíndrica tal como se mostró en la Figura. 4.4. Esta señal adquirida y procesada por el sistema ultrasónico UTIS, almacena la inspección en los diferentes formatos de representación con una extensión propia (.utis) que puede ser exportado a un fichero (.mat) para su posterior procesamiento con el software matemático Matlab.

- 4- Mediante un procesamiento posterior, se obtendrán las imágenes ultrasónicas de atenuación y velocidad. Utilizando las técnicas de reconstrucción tomografías ya descritas en el capítulo anterior, se obtiene una imagen de tomografía ultrasónica de la probeta en la cota que se desee.

En la Figura 4.8 se muestran dos fotografías del sistema tomográfico desarrollado. Una vista frontal del sistema se observa en a) y en b) se puede apreciar una vista trasera.

Figura 4.8 Fotografías del sistema de tomografía ultrasónica construido a) vista frontal b) vista trasera

Finalmente se observa al tomógrafo junto con los diferentes equipos utilizados en la Figura 4.9.

Figura 4.9 Sistema completo

El sistema permite la detección de heterogeneidades como vacíos, cuerpos extraños o discontinuidades en materiales resistentes al agua. Además, si el material fue degradado, este sistema es capaz de detectar su daño y profundidad. Los resultados obtenidos destacan la ventaja del sistema de inspección IMAUSHOR para ser utilizado en campo de ensayos no destructivos y una solución atractiva para el diagnóstico de infraestructuras civiles para evaluar su estructura interna.

4.2. Diseño de las probetas

Para el estudio de la propagación de onda en las inspecciones ultrasónicas se han diseñado y fabricado un conjunto de probetas de hormigón que permite la caracterización de los aspectos más relevantes en vista del objetivo marcado en esta tesis. Se ha buscado simplificar en lo posible la estructura y los materiales utilizados para que de esta manera queden claro mediante las imágenes tomográficas mostradas la capacidad y limitaciones de esta técnica para detectar las armaduras y determinar su grosor.

Para estudiar el comportamiento de las inclusiones más comunes encontradas en hormigón, vigas, y aire ocluido, se han embebido barras de acero y tubos de PVC. Estos dos materiales producen una alta y baja impedancia acústica respectivamente, el acero es aproximadamente de $46 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s} / \text{m}$, y el aire $0 \text{ Pa} \cdot \text{s} / \text{m}$ en comparación con el hormigón que es aproximadamente $10 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s} / \text{m}$. Con el fin de cubrir una gama completa de impedancias acústicas, se han añadido inclusiones de barras de aluminio que tiene cerca de $17 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s} / \text{m}$.

Se han realizado dos prototipos de probetas. En el primero se optó por colocar las barras y tubos incrustados en una base de madera, como se puede apreciar en la Figuras 4.10 y 4.11, no obstante hubo una deformación de la madera en el proceso de curado del hormigón (inmersión de la probeta 28 días) dando lugar a la rotura de las probetas y a la aparición de fisuras. Lo anterior se solucionó con el segundo prototipo optando por una base de plástico, ver Figura 4.13.

Figura 4.10 Esquema del primer prototipo

En Figura 4.11 se muestran las tres probetas obtenidas en la primera fabricación. En este primer estudio se optó por inclusiones de un mismo diámetro para las tres barras a diferentes alturas.

- 1- Probeta de hormigón de 150x300 mm, con inclusión de tres tubos de PVC: todas con el mismo diámetro $\phi 20\text{mm}$, una barra larga de 20mm, una barra media de 15mm de altura y una barra corta de 10 mm de altura.
- 2- Probeta de hormigón de 150x300 mm, con inclusión de tres barras de aluminio: todas con el mismo diámetro $\phi 20\text{mm}$, una barra larga de 20mm, una barra media de 15mm de altura y una barra corta de 10 mm de altura.
- 3- Probeta de hormigón de 150x300 mm, con la inclusión de tres barras de acero (barras trenzadas): todas del mismo diámetro $\phi 14\text{mm}$, una barra larga de 20mm de altura, una barra media de 15mm de altura y una barra corta de 10 mm de altura.

Figura 4.11 Probetas fabricadas (1) con inclusiones de tubo de PVC, (2) con inclusiones de barras de aluminio y (3) inclusion de barras de acero

Un esquema con la ubicación de los defectos para la segunda fabricación se muestra en la Figura 4.12. En esta ocasión se optó por ampliar el estudio, en este, además de buscar la posición de las barras como en la primera fabricación, también se agregaron barras de tres diámetros diferentes para cada una de las inclusiones embebidas. Los tamaños de las inclusiones son similares a la longitud de onda de los transductores ultrasónicos (16 mm) y están cerca del umbral de detectabilidad.

Figura 4.12 Esquema con la ubicación de las inclusiones en el segundo prototipo

En la Figura 4.13 se muestran las tres probetas obtenidas en la segunda fabricación:

- 1- Probeta de hormigón de 150x300 mm, con base de 23.26 mm de altura y con inclusión de 3 tubos de PVC: una barra corta (I-1) con $\phi 20$ mm y 87.75 mm de altura, una barra media (I-2) de $\phi 25$ mm y 126.87 mm de altura y una barra larga (I-3) de $\phi 32$ mm y 177.21 mm de altura. Se han rellenado los tubos de PVC con espuma de poliuretano, polímero con densidad muy baja.
- 2- Probeta de hormigón de 150x300 mm, con base de 23.26 mm de altura y con inclusión de tres barras de aluminio: barra corta (I-1) de $\phi 16$ mm y 77.24 mm de altura, una barra media (I-2) de $\phi 22$ mm y 126.20 mm de altura y una barra larga (I-3) de $\phi 30$ mm y 177.02 mm de altura.

Figura 4.13 Probetas fabricadas (1) con inclusiones de tubos de PVC, (2) con inclusiones de barras de aluminio y (3) inclusion de barras de acero.

- 3- Probeta de hormigón de 150x300 mm, con base de 23.52 mm de altura y con la inclusión de tres barras de acero: una barra corta (I-1) de $\phi 16$ mm y 78.13 mm de altura, una barra media (I-3) de $\phi 19.5$ mm y 127.50 mm de altura y una barra larga (I-3) de $\phi 28$ mm y 177.28 mm de altura.

Una tabla resumen con el tamaño y las alturas de las inclusiones embebidas en el segundo prototipo se muestra a continuación (Tabla 4.1)

Material	Inclusión 1 (I-1)	Inclusión 2 (I-2)	Inclusión 3 (I-3)
Tubos PVC	$\phi = 20$, H=70 mm	$\phi = 25$, H=120 mm	$\phi = 32$, H=170 mm
Barras Aluminio	$\phi = 16$, H=70 mm	$\phi = 22$, H=120 mm	$\phi = 30$, H=170 mm
Barras Acero	$\phi = 16$, H=70 mm	$\phi = 19.5$, H=120 mm	$\phi = 28$, H=170 mm
Tabla 4.1 Materiales y tamaños de las inclusiones			

Para la fabricación de las probetas de hormigón se utilizó cemento blanco de Portland CEM I 52.5R, arena sílice (tamaño máximo de 4 mm), agregados de piedra caliza triturada (tamaño máximo de 30mm), y como elemento aditivo se utilizó superplastificantes ViscoCrete 5980 para mejorar la trabajabilidad, la proporción de la mezcla se exponen en la Tabla 4.2. Para la fabricación y moldeado de las probetas se siguió la norma estándar [85].

Material	Cemento (kg/m³)	Arena (kg/m³)	Agregados (kg/m³)	Agua (kg/m³)	Superplastificante (% peso del cemento)
Dosificación	433	983	1000	177.53	0.01
Tabla 4.2 . Proporción de la mezcla para las probetas de hormigón					

El tomógrafo realiza un barrido en altura de 140 cm, equivalente a los 300 cm² de las probetas restando la base plástica, y devuelve un fichero que permitirá sacar el sinograma de velocidades y amplitudes, que fueron explicados en el Capítulo 3.

Por tanto, dependiendo de la cota inspeccionada de la probeta que se elija para sacar el sinograma, el corte tomográfico no deberá detectar ninguna inclusión (0), una inclusión (1), dos inclusiones (2), o tres inclusiones (3).

4.3. Procedimiento y parámetros de las inspecciones

Las inspecciones se han realizado en inmersión en agua a una temperatura (T) aproximada de 20°C las dimensiones del tanque portátil utilizado son (400x400x500 mm³). Como ya se ha indicado en el capítulo 3, los transductores utilizados son V413 de Olympus. Nominalmente son de 500Khz y tienen forma rectangular de (25,4 x 12,7) mm. Debido a que el hormigón es un material altamente dispersivo aunque se emite un pulso de 500 kHz, las señales se recibirán únicamente a frecuencias aproximadamente por debajo de 200 kHz.

En cuanto a los parámetros electrónicos utilizados, se ha excitado el emisor con un semi-pulso rectangular de 500 kHz y 400V y se ha amplificado la señal entre 20 y 60 dB. Se han adquirido 400 muestras a una frecuencia de muestreo de 10 MHz, y se ha aplicado un retardo en la adquisición de 68 μ s. El sistema electrónico está diseñado para funcionar in situ con 24V y consumir 60W

Con el sistema desarrollado se han realizado dos inspecciones:

- Inspección radial o diametral a lo largo de la altura de la probeta
- Inspección tomográfica.

El procedimiento y los parámetros de inspección utilizados se exponen a continuación:

En la inspección radial, se ha realizado un barrido de la probeta, fijando el emisor y el receptor en posiciones diametralmente opuestas y con un incremento de altura de 2 mm y girando la probeta 360°.

Para la segunda inspección con el sistema desarrollado se ha realizado un barrido total de las tres probetas. El procedimiento y los parámetros de inspección utilizados se exponen a continuación:

- Barrido 1. Barrido vertical o en z: Se han realizado una inspección a diferentes cotas de las probetas con un incremento de altura de 2 mm. Dependiendo de la cota inspeccionada la probeta presenta 0, 1, 2 o 3 defectos.
- Barrido 2. Posición relativa emisor-receptor: El ángulo de variación, α , de la posiciones relativas en el anillo emisión-receptor se ha variado un máximo de 220° , o lo que es lo mismo de 70° a 290° , situando el emisor en la posición 0° . Se ha obtenido una señal ultrasónica en transmisión cada grado, equivalente a 220 rayos ultrasónicos. (Figura 4.14) en consecuencia el ángulo de restricción es de 70° . El movimiento programado es equivalente a tener 100 posiciones de emisión.

Figura 4.14 Barrido 2. Movimiento relativo entre emisor-

- Barrido 3. Se ha girado la probeta 360° y cada 3.6° se ha realizado un barrido 2 variando la posición relativa emisor-receptor tal como se ha descrito anteriormente Figura 4.15.

Figura 4.15. Barrido 3. a) movimiento rotacional de la probeta. b) movimiento del emisor equivalente.

Por tanto cada cota contiene los A-scans procedentes de las 100 posiciones del emisor por 220 posiciones del receptor, dando como resultado 100 imágenes de B-scan por 220 señales tomadas cada 2 mm o 22000 A-scan. Cada uno de los B-scan contiene las señales transmitidas desde el emisor a cada una de las 220 posiciones del receptor.

En la Figura 4.16 se observan las diferencias entre dos B-scans de la probeta fabricada con inclusión de tubos de PVC, se muestra una comparación entre una cota sin inclusión de barras y otra cota con la inclusión de las tres barras.

Obsérvese la no uniformidad y la dispersión que provoca la onda ultrasónica debido a la heterogeneidad del material. Las imágenes muestran el conjunto de señales recogidas por los 220 receptores. El frente de onda está curvado debido a las posiciones relativas entre los emisores y los receptores. La presencia de inclusiones provoca pequeñas huellas en el frente de onda.

Figura 4.16 B-scan probeta de hormigón con inclusion de tubos de PVC

El efecto que provoca la variación de la intensidad del campo ultrasónico generado por el emisor y al cambio del paralelismo entre los transductores emisor receptor, ha sido corregido mediante técnicas de compensación de ganancia o curva CAT aplicada en la inspección. Obsérvese que se ha logrado compensar las amplitudes en las posiciones laterales con respecto a las posiciones centrales.

A partir de las señales ultrasónicas adquiridas se obtiene los sinogramas tanto de tiempo de vuelo como de atenuación que fueron explicados en el Capítulo 2. En el siguiente Capítulo se mostrarán una comparación de los mismos.

4.4. Resumen del capítulo

En este capítulo se ha presentado una descripción detallada del sistema de tomografía ultrasónica en transmisión para probetas con simetría cilíndrica “IMAUSHOR”. Este sistema es una aportación de esta tesis, protegida bajo la patente (PCT/ES2011/070499)[74].

Se ha realizado la descripción de las probetas de hormigón fabricadas. Se han embebido tres tipos de materiales barras de aluminio, de acero así como tubos de PVC, cubriendo así una gama completa de impedancia acústica y posibles inclusiones más comunes encontradas en el hormigón.

En el próximo capítulo se procederá al análisis de los resultados obtenidos.

5. Análisis de los resultados

En este capítulo se exponen y analizan los resultados experimentales. Primeramente se realiza un estudio comparativo de los sinogramas, tanto de atenuación como de velocidad. Estos han sido calculados a partir de las señales experimentales obtenidas con el sistema tomográfico explicado en el capítulo anterior. A partir de estos sinogramas se han reconstruido las imágenes tomográficas. Se presentan las reconstrucciones tomográficas de las probetas en ciertas cotas, así como las imágenes tridimensionales axiales. Se presenta el estudio relativo a la sintonización de los parámetros del tomógrafo utilizando señales experimentales que complementa al ya hecho en el Capítulo 3 dedicado a las simulaciones. Finalmente, mediante un procedimiento de segmentación de imágenes, se realiza un estudio cuantitativo de la detección y estimación de los diámetros de las inclusiones.

En los capítulos anteriores se ha realizado una descripción de todo el proceso necesario para obtener la tomografía ultrasónica en transmisión, comenzando por la técnica empleada, los algoritmos de reconstrucción, el Software de simulación utilizado SimNDT, y el sistema de tomografía por ultrasonidos “IMAUSHOR”.

En este capítulo, se muestran los resultados experimentales. Los escenarios simulados en el Capítulo 3 se basan en las probetas de hormigón fabricadas y utilizadas en este capítulo.

Como se ha mencionado a lo largo de esta tesis la salida de la inspección tomográfica realizada a estos materiales cementicios son las correspondientes señales ultrasónicas que permiten calcular los sinogramas utilizados. Estos, son la entrada de los métodos de reconstrucción explicados en el Capítulo 2 y que tienen como resultado la imagen reconstruida.

El hormigón es un material heterogéneo, esto hace que las ondas ultrasónicas tengan una propagación compleja en la que diferentes fenómenos físicos, como la reflexión, la

difracción, la dispersión y la conversión de modo interactúan de tal manera que puede enmascarar la información relevante sobre las estructuras embebidas [86]. Con el fin de considerar este aspecto, se ha utilizado un hormigón de alta resistencia, cuyo tamaño máximo de agregados es similar a las inclusiones incrustadas. Las imágenes ultrasónicas de un hormigón altamente heterogéneo y con inclusiones múltiples es compleja y complicada de interpretar y por lo tanto es difícil la localización de materiales embebidos[87].

5.1. Resultados de las inspecciones

A partir de las inspecciones realizadas con el sistema tomográfico, en este apartado se presentan dos tipos de resultados.

- Inspecciones radiales. Se realiza un barrido de la probeta teniendo en cuenta únicamente las inspecciones realizadas cuando el emisor y el receptor están en posiciones diametralmente opuestas. Cada giro de la probeta corresponde a un incremento en altura de 2mm.
- Inspecciones tomográficas. Se tienen en cuenta todos los rayos hasta formar la imagen.

5.1.1. Resultados de las inspecciones radiales.

El mapa resultante de atenuación y velocidad del primer conjunto de probetas se pueden observar en la Figura 5.1.

El eje x representa la posición del transductor alrededor del diámetro, una vuelta completa de la probeta 360 grados se obtiene cada 100 puntos, correspondiente a una cota, por lo que el paso de inspección fue de 3.6 grados.

El eje y representa la altura de la muestra y la falta de color indica la información de atenuación y velocidad. Las imágenes son simétricas con respecto al eje x. Solo es posible ver dos de las tres barras dada la disposición de las mismas, al estar dos de ellas alineadas. Por estas razones y para evitar equivocaciones sólo se representan dos barras,

aunque en las imágenes se pueden observar cuatro zonas debido a la simetría de las muestras.

Figura 5.1 Mapa de atenuación y de velocidades para el primer conjunto de probetas a) Tubos de PVC, b) Barras de aluminio y c) Barras de acero

Se puede observar que los especímenes con tubos de PVC y barras de aluminio tienen mayor velocidad. Las barras de aluminio provocan un incremento de velocidad en las zonas donde están localizadas, mientras que los tubos de PVC la disminuyen. Las barras de acero no afectan en gran medida la velocidad debido a que el tamaño de las mismas en comparación con la longitud de onda es similar.

Con el segundo conjunto de probetas de hormigón obtenidas, se llevó a cabo un estudio del proceso de curado de las mismas durante el primer mes.

El proceso de fraguado y endurecimiento es el resultado de reacciones químicas de hidratación entre los componentes del cemento. La fase inicial de la hidratación se llama fraguado y se caracteriza por el paso de la pasta del estado fluido al estado sólido. Esto se observa de forma sencilla por simple presión con un dedo sobre la superficie del hormigón. Posteriormente continúan las reacciones de hidratación alcanzando a todos los constituyentes del cemento que provocan el endurecimiento de la masa y que se caracteriza por un progresivo desarrollo de resistencias mecánicas. Lleva un ritmo rápido en los primeros días hasta llegar al primer mes donde se estabiliza, como puede observarse en la Figura 5.2.

Figura 5.2 Mapa de atenuación completo del segundo conjunto de probetas

En todas las imágenes se puede observar la heterogeneidad de las probetas de hormigón, aun cuando todas pertenecen a la misma amasada (mezcla). Las barras insertadas en las

probetas modifican de forma diferente la imagen ultrasónica. Las probetas con inclusión de tubos de PVC y acero crean áreas que presentan zonas de mayor atenuación. En todos los casos es posible la correcta identificación de las barras en las imágenes.

5.1.2. Resultados de las inspecciones tomográficas

Sinogramas

La Figura 5.3 muestra una comparación entre los sinogramas adquiridos de tiempo de vuelo, para el segundo conjunto de probetas.

Figura 5.3 Sinograma de tiempo de vuelo

Obsérvese como las imágenes de los sinogramas de tiempo de vuelo en las tres probetas nos brindan la misma información, apenas hay diferencias entre ellos, la imágenes tienen muy poco contraste en los tres casos.

Figura 5.4 Sinogramas atenuación a) escala lineal. b) escala logarítmica primer conjunto de probetas

Las Figuras 5.4 y 5.5 muestran un ejemplo de los sinogramas de atenuación obtenidos para diferentes cotas donde se localizan 1, 2 y 3 inclusiones tanto para el primer conjunto de probetas como para el segundo respectivamente.

Obsérvese como la figura sinusoidal de la cota cuando se tiene una inclusión es más clara y mejor definida, siendo más complicada de observar a medida que aumentan las inclusiones. Nótese la dificultad de separar las diferentes contribuciones al sinograma de cada una de las inclusiones, debido principalmente al comportamiento heterogéneo del hormigón.

Tubos de PVC

Barras de Aluminio

Figura 5.5 Sinogramas atenuación a) escala lineal. b) escala logarítmica para el segundo conjunto de probetas

Hay que destacar que la información proporcionada por las proyecciones o sinogramas obtenidos de tiempo de vuelo, nos brindan muy poca información en comparación con los sinogramas de atenuación, tienen menos contraste. Las sinusoides apenas son perceptibles. Esto se traduce en que la imagen reconstruida a partir de este sinograma no dé información acerca de los defectos, por tanto en general, las reconstrucciones que se van a realizar son únicamente a partir de los sinograma de amplitud en todas las probetas. No obstante, se mostraran también algunas reconstrucciones de tiempo de vuelo aun cuando con esta no se logre información.

Imágenes tomográficas

La Figura 5.6 muestra las reconstrucciones obtenidas con los sinograma de tiempo de vuelo.

Figura 5.6 Reconstrucciones de tiempo de vuelo

Como era de esperar y se puede observar en la Figura 5.6, las reconstrucciones obtenidas con los sinogramas de tiempo de vuelo poseen pocos contrastes para determinar inclusiones de las probetas fabricadas. Por lo que el estudio de la sintonización de la configuración del tomógrafo patentado y el estudio de la reconstrucción tomografía de los materiales cementicios se llevarán a cabo con la información adquiridas de los sinogramas de atenuación

En la Figura 5.7 se muestra las reconstrucciones tomografías de la probeta de hormigón en una de las cotas donde se localiza una inclusión de tubo de PVC tanto para el primer conjunto de probetas como para el segundo. En la fila a) se localiza el sinograma con escala lineal adquirido de la inspección y su respectiva reconstrucción tomográfica, en la fila b) podemos observar el mismo sinograma pero aplicando una escala logarítmica y su respectiva reconstrucción.

Como puede observarse, aplicando la transformación logarítmica se reduce el rango dinámico de la amplitud de la señal ultrasónica recibida. De este modo, se resalta la atenuación producida por las inclusiones.

Figura 5.7 Reconstrucción tomográfica con sinogramas de atenuación para las probetas con inclusión de tubos de PVC a) y c) escala lineal b) y d) escala logarítmica, a) y b) primer conjunto de probetas c) y d) segundo conjunto de probetas

Utilizando estos sinogramas, nos proporciona una imagen más nítida y con mayor contraste con respecto a la localización de la inclusión, por este motivo, en las próximas

reconstrucciones solo se mostrarán las imágenes tomográficas adquiridas utilizando estos sinogramas.

En la Figura 5.8 se muestran las reconstrucciones obtenidas para el primer conjunto de probetas para una selección de algunas cotas donde se localizan 1, 2 y 3 defectos para las tres probetas fabricadas.

Obsérvese las reconstrucciones de las imágenes tomográficas para el primer conjunto de probetas fabricadas, validando diferentes posiciones y materiales de inclusión, pero el mismo diámetro de barras. Todas las imágenes tienen un tamaño de 80x80 pixeles equivalente al diámetro exterior del anillo del sistema de inspección. También, se puede observar un anillo externo de color azul en las imágenes reconstruidas. Este anillo está formado por los múltiples ecos producidos en el anillo de aluminio del sistema de inspección.

Figura 5.8 Reconstrucciones obtenidas en el primer conjunto de probetas

Las posiciones de los tubos/barras se obtienen con bastante precisión independientemente del número de los mismos. En todos los casos, es posible identificar correctamente las diferentes inclusiones en las imágenes tomográficas reconstruidas.

5.2. Estudio cuantitativo de las reconstrucciones

En la Figura 5.9 se muestran las reconstrucciones de las imágenes tomográficas en algunas de las cotas que se han seleccionado. Las probetas de hormigón, tal como se muestran en las imágenes, son de 50 pixeles de diámetro, lo equivalente a 150 mm reales del diámetro de las probetas representado por un círculo de color negro en las imágenes.

También, se puede observar en la reconstrucción, un anillo externo de color azul. Este anillo está formado por los múltiples ecos y rebotes, producidos en el anillo de aluminio del sistema de inspección, ver Figura 4.9. Obsérvese que en todas las imágenes se ha logrado reconstruir las inclusiones.

Figura 5.9 Reconstrucciones elegidas

Las posiciones de las barras y los tubos, así como el tamaño relativo de los mismos se obtienen con buena precisión independiente de su número. Los mejores resultados se obtienen para una y tres inclusiones. Dependiendo del material, todas las barras y tubos insertados en las probetas modifican la imagen ultrasónica de forma diferente. En todos los casos, es posible identificar correctamente las diferentes inclusiones en las imágenes de las reconstrucciones tomográficas.

En el centro de todas las probetas existe una zona de alta amplitud (baja atenuación). Cuando los transductores no están diametralmente opuestos (es decir, cuando la trayectoria entre el emisor y el receptor no cruza la zona central de la probeta), la señal que se recibe es muy atenuada, aun cuando la trayectoria de la señal ultrasónica que viaja a través de la muestra es más corta, en comparación con el caso en que están enfrentados o diametralmente opuestos. Este efecto se ha logrado corregir parcialmente mediante un procedimiento de apodización, implementado a través del sistema de inspección aplicando diferentes ganancias en función de las posiciones emisor-receptor (es decir, bajas ganancias dentro de los límites del rango dinámico de adquisición).

En todas las imágenes, nótese que la interfaz agua/probeta (zonas azules en los bordes de las probetas) apenas se puede observar, esto se debe a que la transmisión del pulso ultrasónico se ve ocultado por los múltiples ecos y rebotes que se producen en el anillo de aluminio del sistema de inspección de la tomografía ultrasónica.

➤ Segmentación de las imágenes

Para evaluar la calidad de las imágenes ultrasónicas reconstruidas, se genera una imagen segmentada basada en la aplicación de un umbral del máximo. El tamaño asignado depende del umbral de segmentación.

En ensayos y evaluación no destructiva, el umbral para detectar un defecto o inclusión se determina usando una muestra o medida estándar, por ejemplo, un diámetro conocido sobre una muestra del mismo material a inspeccionar[88].

Figura 5.10. Segmentación

En este trabajo se ha utilizado la barra de hierro con mayor grosor como patrón de inclusión para fijar el umbral. Este umbral se ha aplicado por igual, primeramente seleccionado las cotas anteriores del tomograma donde se detectaron las 0, 1, 2 y 3 inclusiones, con el fin de mostrar resultados parciales y una estimación del tamaño de las diferentes inclusiones. Al igual que en otras áreas de investigación en las que se utiliza imágenes ultrasónicas (soldadura, material aeronáutico, medicina, etc.), sería necesario fabricar un espécimen con las mismas características que la estructura a inspeccionar: tipo de hormigón, refuerzo, dosificación, etc. Por lo tanto, las características y el estado de la estructura inspeccionada se analizarían en comparación con la imagen del espécimen que se ha utilizado para calibrar el sistema tomográfico.

Todas las imágenes se procesan con un umbral del 30%. En la Figura 5.10 se puede observar en la primera columna la cota que contiene la inclusión de mayor diámetro, en la segunda columna se muestran la cota que contienen la inclusión de mayor diámetro y

de diámetro medio, y en la tercera columna nótese la cota donde podemos observar la aparición de las tres barras/tubos con sus respectivos diámetros. Se puede observar las diferencias entre las dimensiones reales y las estimadas de las inclusiones. En el caso de los tubos de PVC, el tamaño estimado es similar a las dimensiones reales de las inclusiones, que son ligeramente sobredimensionadas. En el caso de las barras de aluminio, el tamaño estimado es menor que las dimensiones reales de las barras introducidas. Este efecto se puede explicar por la simulación presentada en el Capítulo 2: donde las barras de aluminio disminuyen ligeramente la amplitud de la señal ultrasónica, con una impedancia acústica cercana a la del hormigón.

Las posiciones de las inclusiones se obtienen con buena precisión, pero con un ligero desplazamiento de unos pocos milímetros hacia el borde de las probetas. Este efecto se debe al umbral de segmentación, que es sensible a las posiciones no diametralmente opuestas de los transductores. La mayor parte de las inclusiones tienen formas elipsoidales, con el eje principal orientado radialmente debido a la razón mencionada anteriormente.

➤ **Cuantificación de la segmentación. Estimación parcial de los errores**

A partir de las imágenes segmentadas, se han definido dos medidas objetivas relacionadas con el área y el diámetro de las inclusiones, para evaluar la calidad de las estimaciones.

El área estimada ($\hat{A}$ (mm²), se ha obtenido a partir del número de píxeles adquiridos cercanos a la posición de inclusión y considerando que el área en píxeles es 9 mm². El error de estimación de área $\varepsilon_A(\%)$ se ha definido como:

$$\varepsilon_A(\%) = \frac{(\hat{A} - A)}{A} \cdot 100 \quad [5.1]$$

Donde $A(\text{mm}^2)$ es el área real de la inclusión.

El diámetro medio de cada inclusión ($\bar{D}$) en mm se ha calculado a partir del área estimada como:

$$\bar{D} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\hat{A}}{\pi}} \quad [5.2]$$

El error en la estimación del diámetro de las inclusiones ε_D se puede calcular como:

$$\varepsilon_D(mm) = \bar{D} - D \quad [5.3]$$

Donde, D es el diámetro de la inclusión real. Este error es en milímetros, pero es necesario tener en cuenta que la longitud de un píxel es de 3 mm, de manera que el error máximo producido en la estimación del diámetro medio es 3 píxeles, como se muestra en la Tabla 5.2 para hormigón con barra de aluminio (I-3).

		Dimensiones reales		Dimensiones estimadas (1 inclusión)				Dimensiones estimadas (2 inclusiones)				Dimensiones estimadas (3 inclusiones)			
		A	D	$\hat{A}$	ε_A	$\bar{D}$	ε_D	$\hat{A}$	ε_A	$\bar{D}$	ε_D	$\hat{A}$	ε_A	$\bar{D}$	ε_D
PVC	I-3	804	32	1044	30	36	4	738	-8	31	-1	747	-7	31	-1
	I-2	490	25					423	-14	23	-2	738	51	31	6
	I-1	314	20									216	-31	17	-3
Al	I-3	706	30	360	-49	21	-9	567	-20	27	-3	387	-45	22	-8
	I-2	380	22					351	-8	21	-1	162	-57	14	-8
	I-1	201	16									135	-33	13	-3
Acero	I-3	615	28	693	13	30	2	522	-15	26	-2	765	24	31	3
	I-2	298	19					378	27	22	3	378	27	22	3
	I-1	201	16									171	-15	15	-1
Tabla 5.1 Dimensiones estimadas (diámetro y área) a partir de la segmentación															

5.3. Estudio de los parámetros del tomógrafo

Como complemento a la simulación realizada en el apartado 3.3 relativa a la sintonización de los parámetros con las señales experimentales capturadas con el sistema tomográfico. Se han variado los siguientes parámetros:

1. N° de receptores.
2. N° de posiciones del emisor

En definitiva, se dispone de una configuración estilo abanico como la mostrada en la Figura 2.6, donde la probeta cilíndrica se rota de manera que se obtiene un barrido

completo de la misma, obteniendo una disposición que consideramos de referencia o patrón con 220 receptores, 100 posiciones del emisor.

Para la reconstrucción tomográfica se ha utilizado un algoritmo iterativo tipo SIRT, donde se ha reconstruido una imagen de 240 mm x 240 mm (diámetro del anillo de transductores en la inspección) dividido en una cuadrícula de 80x80 pixeles, 3 mm/pixel. La anchura del haz ultrasónico para determinar el peso de cada uno de los pixeles en los diferentes rayos se ha considerado de 20 mm, Figura 5.11.

Figura 5.11 Anchura del haz ultrasónico en el pixelado de la imagen.

Para disminuir el número de receptores o las posiciones de los emisores se ha utilizado el mismo sinograma patrón de la Figura 5.9, pero diezmando el número de filas o columnas.

5.3.1. Variación del número de receptores

De los dos parámetros elegidos para la comparación y poder observar el comportamiento de los materiales bajo estudio, iremos variando la configuración de referencia o patrón primeramente disminuyendo a la mitad el número de receptores (110), una cuarta parte (56), y una octava parte (28).

La Figura 5.12 muestra los resultados del estudio cuando se varía el número de receptores.

Figura 5.12 Variaciones del número de receptores

Con la disminución del número de receptores de la señal ultrasónica, las imágenes en todas las reconstrucciones para las 3 probetas se ven afectadas.

Cuando disminuimos a la mitad el número de receptores (110), apenas se ve perturbada las imágenes, con esta variación se siguen localizando en todas las cotas las inclusiones en las tres probetas.

Si se disminuye a una cuarta parte (56) el número de receptores, las inclusiones de la probeta con tubos de PVC en la reconstrucción levemente han cambiados en todas las cotas, apenas le afecta, las inclusiones de barras de aluminio y de aceros en todas las cotas se ven afectadas, disminuye levemente el tamaño de las inclusiones reduciendo su adquisición.

Cuando se selecciona uno de cada 8 el número de receptores (28), en la probeta con tubos de PVC las inclusiones se ven ligeramente afectadas en todas sus cotas, en las probetas con barras de aluminio y de acero. Esta variación afecta en su totalidad a las imágenes, la adquisición de las inclusiones prácticamente se ha perdido.

Observando los cambios producidos en las imágenes, podemos concluir que para la adquisición de las inclusiones de tubos de PVC podría considerarse aceptable la disminución hasta una tercera parte de los receptores (28), la variación producida en la calidad de la imagen es leve en todas las cotas. Para la adquisición de las inclusiones con barras de aluminio y de acero, disminuir a una cuarta parte el número de receptores (56) podría aceptarse, pero inadmisible la reducción a 28 receptores.

5.3.2. Variación del número de emisores

En este estudio iremos variando la configuración de referencia u optima, dejando fijo el número de receptores (220) y disminuyendo el número de posiciones del emisor a la mitad (50), una cuarta parte (25), y una octava parte (12).

Figura 5.13 Variaciones del número de emisores

La Figura 5.13 muestra los resultados del estudio cuando se varía el número de emisores.

Con la disminución del número de emisores de la señal ultrasónica, las imágenes en todas las reconstrucciones para las tres probetas se ven afectadas de forma similar que en la variación del número de receptores.

Cuando disminuimos a la mitad el número de emisores (50), apenas se ve afectadas las imágenes, con esta variación se siguen localizando en todas las cotas las inclusiones en las tres probetas.

Cuando se seleccionan en 25 al número de posiciones del emisor la imagen de las reconstrucciones con inclusiones de barras de aluminio y de acero se ven afectadas, para las barras de aluminio este cambio ha afectado totalmente, ha disminuido el tamaño de las barras, para la imagen con dos y tres inclusiones de aluminio la barra pequeña y mediana ha desaparecido. Esta variación solo podría ser aceptada para el caso donde haya mucha diferencia de impedancia acústica como es el caso de los tubos de PVC.

Si se disminuye a una octava parte (12) el número de emisores, todas las imágenes se ven afectadas casi en su totalidad, la adquisición de las inclusiones prácticamente se ha perdido en las reconstrucciones con barras de aluminio y de acero, en las reconstrucciones con tubos de PVC, solo la barra de mayor tamaño aparece.

Observando los cambios producidos en las imágenes, podemos concluir que para la adquisición de las inclusiones de tubos de PVC podría considerarse aceptable la disminución hasta una cuarta parte de los emisores (25), la variación producida en la calidad de la imagen es leve en todas las cotas. Para la adquisición de las inclusiones con barras de aluminio y de acero, disminuir a una cuarta parte el número de receptores (25) sería inadmisibile.

5.4. Reconstrucciones tridimensionales de las probetas

En la Figura 5.14 se presenta una representación tridimensional de la reconstrucción tomográfica adquiridas para todas las cotas de cada probeta de hormigón (dos para cada

uno). Se muestran dos planos verticales que incluyen las posiciones de las barras / tubos incrustados. Los resultados obtenidos coinciden con las simulaciones realizadas.

Cuando la diferencia de impedancia acústica es alta, por ejemplo, hormigón / aire y hormigón / acero, las dos inclusiones de mayor sección (I2 e I3) están bien delimitadas

en posición y tamaño. Sin embargo, la inclusión incorporada I1 no es claramente visible en toda su longitud. Cuando las impedancias acústicas son muy similares, hormigón / aluminio, las barras no están delimitadas en toda su extensión. También se pueden ver zonas de alta atenuación, que no corresponden a la posición de las barras. Estas zonas son, a menudo en los bordes de las sondas de prueba, y se deben a vacíos naturales de hormigón. Es necesario tener en cuenta que el tamaño máximo de los agregados utilizados es de 30 mm por lo que la dispersión causada por ellos provoca la dificultad de detectar barras de aluminio y acero.

Puede verse que no todos los tomogramas detectan los materiales incrustados. La detectabilidad de las barras de acero y tubos de PVC son similares, ambos tienen diferentes impedancias acústicas en comparación con el hormigón, lo que resulta imágenes reconstruidas con alto contraste. Por otro lado, las barras de aluminio con impedancia acústica similar al hormigón tienen las cifras de detectabilidad más bajas. Con respecto a los tamaños de las inclusiones, las inclusiones I-1 son difíciles de detectar debido a que su tamaño es similar al tamaño de los agregados de hormigón y a la longitud de onda ultrasónica. Nuevamente las barras de acero y las inclusiones de PVC se comportan de manera similar mientras que las barras de aluminio tienen las cifras más bajas. Estos resultados concuerdan con las conclusiones de la simulación numérica.

5.5. Estudio de los errores de reconstrucción

En la Tabla 5.3 se muestran las dimensiones y área y diámetro real y estimado de barras y tubos embebidos en especímenes de hormigón, así como el error y la desviación estándar. En esta tabla se muestra la media de todas las áreas y diámetros de la totalidad de las barras / tubos detectados. La columna denominada detectabilidad (%) indica el porcentaje de tomogramas donde se detectan las inclusiones, considerando que se detecta si $A > 0,1 \times A$. Los dos tomogramas superiores de cada barra también se han considerado como no detectables para eliminar el efecto de borde en las estimaciones

		Dimensiones reales			Detectibilidad (%)	Dimensiones estimadas					
		A (mm ²)	D (mm)	L (mm)		$\hat{A}$ (mm ²)	$\sigma_{\hat{A}}$ (mm ²)	ε_A (%)	$\bar{D}$ (mm)	$\sigma_{\bar{D}}$ (mm)	ε_D (mm)
PVC	I-3	804	32	170	98	1049	230	30	36	4	4
	I-2	491	25	120	83	508	192	3	25	5	0
	I-1	314	20	70	26	392	52	25	22	2	2
Al	I-3	707	30	170	60	560	154	-21	26	4	-4
	I-2	380	22	120	33	297	134	-22	19	5	-3
	I-1	201	16	70	14	149	117	-26	13	6	-3
Acero	I-3	616	28	170	98	627	141	2	28	3	0
	I-2	299	19,5	120	83	301	112	1	19	4	0
	I-1	201	16	70	23	193	165	-4	14	8	-2
Tabla 5.2 Dimensiones estimadas (diámetro y área) a partir de la segmentación											

A partir de los tomogramas que detectan las inclusiones, se han estimado las dimensiones. Las barras de acero con mayor diámetro (I-3) se han utilizado para definir el umbral para las imágenes segmentadas. Por esta razón, su error es cero. El error de estimación en la barra de acero I2 es bueno, lo que indica que el umbral seleccionado es correcto para estimar el diámetro de las barras de acero. Los tubos de PVC se sobreestiman mientras que las barras de aluminio se subestiman, pero en todos los casos los errores absolutos son menores o iguales a 4 mm. La detectabilidad de la barra de aluminio es menor en comparación con las barras de acero y tubos de PVC, debido a las diferencias en la impedancia acústica y las propiedades elásticas. Resultados similares fueron obtenidos por [89].

De los resultados alcanzados en esta tesis podemos concluir , que conociendo a priori la estructura del prototipo inspeccionado, como por ejemplo la dimensiones, materiales y posiciones teóricas de los refuerzos, así como otras estructuras embebidas como pueden ser conductos de agua, electricidad, cables de acero multi-hilo pretensado, etc., es posible detectar cualquier variación en su estructura así como cualquier proceso que produzca un cambio en la interfaz inclusión-hormigón, utilizando la reconstrucción imagen tomográfica de atenuación. Por ejemplo, si se conoce que la estructura de un refuerzo es de un determinado diámetro, y utilizando tomografía ultrasónica se detecta un diámetro mayor, la conclusión más probable es que ha ocurrido un proceso de microfisuración del hormigón que rodea la inclusión debido a la corrosión o cualquier otro proceso de deterioro o degradación. Otra posibilidad podría ser que el refuerzo

finalmente instalado sea de un diámetro superior al planificado, pero este hecho es fácilmente detectable si la imagen tomográfica presenta este diámetro de forma uniforme.

Finalmente, los resultados experimentales han mostrado que la utilización de un sistema tomográfico ultrasónico de altas prestaciones es una herramienta muy útil para la evaluación de inclusiones en estructuras de hormigón.

5.6. Resumen del capítulo

En este capítulo se han expuesto y analizados los resultados experimentales. Primeramente se ha realizado un estudio comparativo de los sinogramas, tanto de atenuación como de velocidad. Estos fueron calculados a partir de las señales experimentales obtenidas con el sistema tomográfico explicado en el capítulo anterior. A partir de estos sinogramas se reconstruyeron las imágenes tomográficas de las probetas en ciertas cotas, así como las imágenes tridimensionales axiales.

Las reconstrucciones tomográficas de atenuación poseen más contraste que las de velocidad, por lo que en esta tesis se ha incidido especialmente en el estudio de las tomografías basadas en medidas de atenuación.

Los resultados han mostrado que independientemente del material de la inclusión, se producen zonas de gran atenuación en las imágenes tomográficas reconstruidas, por tanto no es posible determinar, solo con la atenuación, el tipo de material.

Las inclusiones han sido detectadas y estimadas tanto en posición como en diámetro utilizando la segmentación de la imagen tomográfica. El estudio cuantitativo de las imágenes reconstruidas se ha presentado tanto para las cotas seleccionadas, donde se localizaron una, dos y tres inclusiones, como para las probetas completas mostrando las imágenes tridimensionales de las mismas.

Se ha comprobado que la precisión de estas mediciones depende de la diferencia de impedancias acústicas entre el hormigón y el material embebido así como del diámetro de las inclusiones. Ha sido posible la detección y estimación de inclusiones múltiples donde el tamaño de la inclusión más pequeña es de aproximadamente dos longitudes de onda (16 mm en hormigón).

La barra de acero con mayor diámetro se ha utilizado para definir el umbral para las imágenes segmentadas. Por esta razón, el diámetro de las inclusiones de acero se estiman con un error muy pequeño, el diámetro de los tubos de PVC se han sobreestimado, mientras que el de las barras de aluminio se han subestimado. En todos los casos los errores absolutos son menores o iguales a 4 mm.

6. Conclusiones y líneas futuras de investigación

6.1. Conclusiones

El objetivo principal de esta tesis ha sido evaluar la capacidad de las imágenes tomográficas en transmisión por ultrasonidos basadas en medidas de atenuación y velocidad para localizar, detectar y estimar los materiales más comunes embebidos en hormigón, refuerzos o huecos, tanto naturales como artificiales.

Como resultado de este trabajo se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. Esta tesis ha desarrollado una metodología que utiliza imágenes de tomografía ultrasónica, basadas en medidas de atenuación y velocidad, para detectar y estimar los materiales más habituales que se encuentran embebidos en el hormigón: refuerzos y huecos tanto naturales como artificiales.
2. Para ello se han fabricado un conjunto limitado de probetas de hormigón en las cuales se han embebido barras de acero y aluminio así como tubos de PVC con los que se han analizado los efectos relativos al tamaño, material y multiplicidad de las diferentes inclusiones.
3. Se han realizado simulaciones del campo ultrasónico utilizando la herramienta SimNDT, desarrollada en el grupo GCARMA. Realizar estas simulaciones como paso previo al proceso de captura de señales experimentales, ha permitido, por una parte, obtener una mejor comprensión del fenómeno dispersión ultrasónica en hormigón, y por otra, sintonizar gran parte de los parámetros del sistema de inspección ultrasónica experimental así como del algoritmo de reconstrucción.

4. Se ha construido un tomógrafo para la inspección ultrasónica automática de probetas cilíndricas que ha permitido obtener los datos experimentales. Ha sido patentado y es una de las aportaciones de esta tesis.
5. Los resultados experimentales han mostrado que:
 - Las tomografías de atenuación poseen más contraste que las de velocidad. Por tanto, en aplicaciones relacionadas con la visualización de inclusiones en hormigón, la atenuación es un parámetro más sensible que la velocidad.
 - Respecto a las tomografías de atenuación:
 - Independientemente del material, las imágenes tomográficas poseen en las inclusiones una zona de alta atenuación, por lo tanto utilizando tomografía de atenuación no es posible determinar el tipo de material de la inclusión.
 - En todos los casos, la posición y el diámetro de las inclusiones ha sido detectadas y estimadas utilizando segmentación de imágenes. La precisión de estas medidas depende de la relación entre las impedancias acústicas del hormigón y el material embebido así como de su diámetro.
 - Ha sido posible la detección y estimación de inclusiones múltiples donde el tamaño de la inclusión más pequeña es de aproximadamente dos longitudes de onda (16 mm en hormigón).
 - Los tamaños de los tubos de PVC y las barras de aluminio han sido estimadas con exceso y con defecto respectivamente. En la detección de las inclusiones afectan fenómenos relacionados con la propagación de la onda ultrasónica como es el ratio reflexión/transmisión de energía producida en el interfaz hormigón-inclusión-hormigón y la relación diámetro-longitud de onda.
 - Finalmente, los resultados experimentales ha mostrado que la utilización de un sistema tomográfico ultrasónico de altas prestaciones es una

herramienta muy útil para la evaluación de inclusiones en estructuras de hormigón

6. De los resultados mostrados en esta tesis muestra que conociendo a priori la estructura el espécimen inspeccionado, como por ejemplo la dimensiones, materiales y posiciones teóricas de los refuerzos, así como otras estructuras embebidas como son conducciones de agua, electricidad, cables de acero multi-hilo pretensado, etc., es posible detectar cualquier variación en su estructura así como cualquier proceso que produce un cambio en el interfaz inclusión-hormigón utilizando la imagen tomográfica. Por ejemplo, si se conoce que la estructura de un refuerzo es de un determinado diámetro, y utilizando tomografía ultrasónica se detecta un diámetro mayor, la conclusión más probable es que ha ocurrido un proceso de micro-fisuración del hormigón que rodea la inclusión debido a la corrosión o cualquier otro proceso de deterioro. Otra posibilidad podría ser que el refuerzo finalmente instalado sea de un diámetro superior al planificado, pero este hecho es fácilmente detectable si la imagen tomográfica presenta este diámetro de forma uniforme.

6.2. Líneas futuras

- Aplicación de otros algoritmos de reconstrucción de imágenes tomográficas, como por ejemplo, la reconstrucción con rayos curvos.
- Aplicar la metodología desarrollada en esta tesis, no solo a probetas sino a estructuras reales.
- Aplicar los métodos estudiados de tomografía ultrasónica en transmisión en otros materiales, como por ejemplo madera, observando si es posible medir el deterioro de la misma, así como fisuras o elementos internos a través de las imágenes tomográficas reconstruidas.
- Con respecto al Sistema de tomografía por transmisión, son varias la versiones y prototipos que se han realizado del Sistema de tomografía portátil, aun cuando esta versión está lista para su posible comercialización y se han presentado

varias aportaciones, queda trabajo por realizar en distintos aspectos, relacionado tanto con el hardware como con el software:

- Con respecto al hardware:
 - Hacer mejoras en el sistema mecánico buscando mayor robustez.
 - Mejorar el diseño del anillo que soporta los transductores de manera que no interfiera en la inspección, eliminación de los cables que están conectados a la computadora para liberar puertos de la misma, así como reducir el espacio utilizado por el sistema.
- Con respecto al software:
 - Realizar la comunicación con el sistema de control de forma inalámbrica.
 - Integrar los algoritmos de reconstrucción de imágenes tomográficas implementados en esta tesis, dentro del sistema.

Bibliografía

1. ASCE *Failure to Act: Closing the Infrastructure Investment Gap for America's Economic Future*. . Available 2016.
2. OECD *Private Financing and Government Support to Promote Long-Term Investments in Infrastructure*. 2014.
3. Schabowicz, K., *Methodology for non-destructive identification of thickness of unilaterally accessible concrete elements by means of state-of-the-art acoustic techniques*". Journal Civil Engineering and Management, 2014. **19**(3): p. 10.
4. Yan Cheng, P.C.H., Rudrajit Mitra, and Shuren Wang, *Defects Visualization Using Acoustic Emission Tomography Technique*. Materials Journal, 2015. **112**(6): p. 12.
5. Gui Yun Tian, A.S., David Taylor, and John Rudlin, *Multiple Sensors on Pulsed Eddy-Current Detection for 3-D Subsurface Crack Assessment*. IEEE Sensors Journal, 2005. **5**(1): p. 7.
6. Schabowicz, K., *Ultrasonic tomography—The latest non-destructive technique for testing concrete members—Description, test methodology, application example*. Arch. Civ. Mech. Eng., 2014. **14**: p. 9.
7. Chekroun, M., et al., *Analysis of coherent surface wave dispersion and attenuation for non-destructive testing of concrete*. Ultrasonics, 2009. **49**(8): p. 743-751.
8. Molero, M., et al., *On the measurement of frequency-dependent ultrasonic attenuation in strongly heterogeneous materials*. . Ultrasonics 2010. **50** (8): p. 824-828.
9. Toutanji, H., *Ultrasonic wave velocity signal interpretation of simulated concrete bridge decks*. Materials and Structures, 2000. **33**(3): p. 207.
10. Young-chul Jung, T.K. and R.E. Mohammad, *A New Nondestructive Inspection Technique for Reinforced Concrete Beams*. Materials Journal. **99**(3).
11. Voigt, T., Y. Akkaya, and S.P. Shah, *Determination of Early Age Mortar and Concrete Strength by Ultrasonic Wave Reflections*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003. **15**(3).
12. Akkaya, Y., et al., *Nondestructive measurement of concrete strength gain by an ultrasonic wave reflection method*. Materials and Structures, 2003. **36**(8): p. 507-514.
13. Wiggensauser, H., *Advanced NDT methods for Quality Assurance of Concrete Structures*., in *NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering2009*: Nantes, France.
14. Reichling, H., et al., *BETOSCAN - Robot controlled non-destructive diagnosis of reinforced concrete decks*., in *NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering2009*: Nantes, France.
15. Uribarri, S.G., *Principios Matemáticos de la Reconstrucción de Imágenes Tomográficas*. Ciencia Ergo Sum, 2004. **10**(3): p. 12.

16. K. Ain, et al. *Summation Convolution Filtered Back Projection and Algebraic Reconstruction Technique for Ring Array Ultrasound Tomography Based on Time of Flight*. in *2nd International Conference on Instrumentation, Control and Automation*. 2011. Bandung, Indonesia.
17. Schickert, M., *Progress in ultrasonic imaging of concrete*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 2005. **38**(283): p. 807-815.
18. M. Krause, B.M., et al, *Ultrasonic Imaging Methods for Investigation of Post-tensioned Concrete Structures: A Study of Interfaces at Artificial Grouting Faults and Its Verification*. Nondestructive Evaluation, 2008. **27**: p. 67-82.
19. M. Schickert, U.T., L. Bühling. *Rapid scanning approaches for ultrasonic imaging of concrete*. in *9th European Conference on NDT (ECNDT) 2006*. Berlin.
20. Frederick, J.R., R.C. Fairchild, and B.H. Anderson, *Improved ultrasonic nondestructive testing of pressure vessels*. 1977, Washington, D.C. : Springfield, Va. 34.
21. Hoegh, K. and Khazanovich, *Correlation Analysis of 2D Tomographic Images for Flaw Detection in Pavements*, in *ASTM Journal of Testing and Evaluation* 2012: Minneapolis.
22. Schickert, M., *Tomographic Imaging Using Multi-Channel Low-Frequency in 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*, U.M. Systems, Editor 2014: Prague, Czech Republic.
23. Aguirre.O, I.V., L.Peña, E.Vidaud, *Evaluación de Integridad Estructural mediante Tomografía Tridimensional Ultrasonica (MIRA)*. Construcción y Tecnología en Concreto, 2013.
24. Michaux.C and G. M. *NDT 3D tomographic testing cases on concrete and national heritage buildings*. in *Proceedings of the Ninth International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*. 2009. Seville, Spain.
25. Clayton and e.a. D. *Evaluation of Ultrasonic Techniques on Concrete Structures*. in *Measurement Science and Systems Engineering Division*. 2013. Oak Ridge, Tennessee:.
26. J.J.Anaya, et al., *Caracterización de materiales cementicios mediante la utilización conjunta de técnicas ultrasónicas y de espectroscopía eléctrica*, in *11º Congreso Español de END* 2007: Madrid.
27. Greenleaf, J.F., *Algebraic reconstruction of a spatial distributions of acoustic absorption with tissues from their two-dimensional acoustic projection*. Acoustical Holografy, 1974. **5**: p. 591-603.
28. Radon, J., *Über die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte lang gewisser mannigfaltigkeiten (on the determination of functions from their integrals along certaing mainfolds)*. Berichte Saechsische Akademie der Wissenschaften, 1917. **29**: p. 262-277.
29. Hounsfield, G., *Apparatus for examining a body by radiaton such as X or Gamma radiation*, 1976: United States.
30. Kalender, W.A., *Computed Tomography: Fundamentals, System Technology, Image Quality, Applications*. 2005, Germany.
31. Deans, S.R., *The Radon Transform and Some of Its Applications* 2007, Mineola, New York Dover Publications, Inc.
32. Philip S. Green, J.S.O., Todd K. Whitehurst, *Combined reflection and transmission ultrasound imaging*. Ultrasound in Medicine & Biology, 1991. **17**(3): p. 283-289.

33. Hai-Dong Liang ; Centre for Phys. & Eng. Res. in Med., B.U., UK ; Halliwell, Michael ; Wells, P.N.T., *Continuous wave ultrasonic tomography*. IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society, 2001. **48**(1): p. 285 - 292.
34. Mensa, D.L.U.S.N., Point Mugu, CA ; Halevy, S. ; Wade, G., *Coherent Doppler tomography for microwave imaging*. Proceedings of the IEEE 1983. **71**(2): p. 254 - 261.
35. Wade, G., et al., *Acoustic Echo Computer Tomography*, in *Acoustical Imaging*, A.F. Metherell, Editor 1980, Springer US. p. 565-576.
36. Daigle, M., D. Fratta, and L.B. Wang. *Ultrasonic and X-ray tomographic imaging of highly contrasting inclusions in concrete specimens*. 2005. Austin, TX.
37. Fellingner, P., et al., *Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT-elastodynamic finite integration technique*. Wave motion, 1995. **21**: p. 47-66.
38. Katsaga, T., *Geophysical Imaging and Numerical Modelling of Fractures in Concrete*, in *Civil Engineering* 2010, Toronto.
39. Valdeón, L., et al., *A Method to Assess Spatial Coordinates in Art and Archaeological Objects: Application of Tomography to a Dolmen*. Journal of Archaeological Science, 1997. **24**(4): p. 337-346.
40. A.Sainsi, Z.L.L.M. *Sonic and Radar Tomography on Masonry Structures*. . in *RILEM TC 177-MDT Workshop on On-Site Control and Non-Destructive Evaluation of Masonry Structure*. 2001. Mantova (ITALY).
41. Luciana Orlando, A.P., Alessandro Colucci, *Modeling and testing of high frequency GPR data for evaluation of structural deformation*. NDT & E International, 2010. **43**(3): p. 216-230.
42. Binda, L., M. Lualdi, and A. Saisi, *Non-Destructive Testing Techniques Applied for Diagnostic Investigation: Syracuse Cathedral in Sicily, Italy*. International Journal of Architectural Heritage, 2007. **1**(4): p. 380-402.
43. Martínez-Martínez, J., D. Benavente, and M.A. García-del-Cura, *Spatial attenuation: The most sensitive ultrasonic parameter for detecting petrographic features and decay processes in carbonate rocks*. Engineering Geology, 2011. **119**(3-4): p. 84-95.
44. Chai, H.K., et al., *Tomographic reconstruction for concrete using attenuation of ultrasound*. NDT and E International, 2011. **44**(2): p. 206-215.
45. Peterlík, I., et al., *Regularized Image Reconstruction for Ultrasound Attenuation Transmission Tomography*. . Radioengineering, 2008. **2**: p. 8.
46. Kim, K. and D. Fratta, *Travel-time tomographic imaging: multi frequency diffraction evaluation of a medium with high-contrast inclusion*. NDT & Int, 2010. **43**: p. 695-705.
47. Kobayashi, Y., T. Shiotani, and K. Oda, *System Identification for Three-dimensional AE-Tomography with Kalman Filter*, in *31st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE)2014*: Dresden, Germany.
48. Suryono, K., et al., *Ultrasonic Computed Tomography System for Concrete Inspection*. International Journal of Civil & Environmental Engineering, 2011. **11**(05).
49. Fan, H., H. Zhu, and Q. Han, *Image reconstruction of concrete based on Filtered Backprojection method using ultrasonic time of flight data*. Computer Modelling and New Technologies, 2014. **18**(6): p. 72-78.

50. Vladimir Guilherme Haach, L.M.J. *Application of ultrasonic tomography to detection of damages in concrete*. in *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2014*. 2014. Porto, Portugal.
51. Candelas Valiente, P., *Contribución al ensayo No Destructivo de materiales mediante tomografía ultrasónica*, 2003, Universidad Politécnica de Valencia.
52. Chai, H.K., et al., *Single-side access tomography for evaluating interior defect of concrete*. Construction and Building Materials 2010. **24**(12): p. 2411-2418.
53. Haach, V.G. and F.C. Ramirez, *Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography*. Construction and Building Materials, 2016. **119**: p. 61-70.
54. Beniwal, S., D. Ghosh, and A. Ganguli, *Ultrasonic imaging of concrete using scattered elastic wave modes*. NDT & E International, 2016. **82**: p. 26-35.
55. Kuttruff, H., *Ultrasonics: fundamentals and applications*. Vol. XIV. 1991, London: Elsevier Applied Science. 452.
56. Ramírez Gómez, F., Fernández Soler, M. A., Alonso Roldán, A., Delojo Morcillo, G., Valdecantos Martínez, C. de los Ríos Rubalcada, J. M., *Métodos de Ensayos No Destructivos* 1980.
57. P. Bruyant, *Analytic and Iterative Reconstruction Algorithms in SPECT*. Nuclear Spectroscopy and Image Processing Research, Claude Bernard University, Lyon, France 2002. **43**: p. 1343-1358.
58. Albert, V., *Evaluación no destructiva de materiales mediante métodos de reconstrucción tomográfica basados en redes neuronales de base radial*, 2010, Politécnica de Valencia.
59. Metz, C.E. and K. Doi, *Transfer function analysis of radiographic imaging systems*. Physics in Medicine and Biology, 1979. **24**(6): p. 1079.
60. Kaks, A.C. and M.G. Slaney, *Principles of Computerized Tomographic Imaging* 2001, New York: Society of Industrial and Applied Mathematics.
61. Bracewell, R.H. and A.C. Riddle, *Inversion of beam scans in radio astronomy*. Astrophysics Journal, 1967. **150**: p. 427-434.
62. Rmanchandran, G.N. and A.V. Lakshminarayanan, *Three dimensional reconstructions from radiographs and electron micrographs, Application of convolution instead of fourier transforms*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1971. **68**: p. 2236-2240.
63. Grossman, S.I., *Algebra Lineal*. 1996: McGraw-Hill.
64. Kaczmarz, S., *Angenäherte Auflösung von, Systemen linearer Gleichungen*. Bulletin International de l'Académie Polonaise des Sciences et des Lettres. Classe des Sciences Mathématiques et Naturelles. Série A, Sciences Mathématiques, 1937. **35**: p. 355-357.
65. Gordon, R., *A Tutorial on ART (Algebraic Reconstruction Techniques)*. IEEE Transactions on Nuclear Science, June 1974. **21**.
66. Gordon, R., R. Bender, G.T. Herman, *Algebraic reconstruction techniques (ART) for threedimensional electron microscopy and x-ray photography*. Journal of Theoretical Biology, 1970. **29**: p. 471-481.
67. Gilbert, P.F.C., *Iterative methods for three-dimensional reconstruction of an object from its projections*. . Journal of Theoretical Biology, 1972. **36**: p. 105-117.
68. Molero, M., Ursula Iturraran-Viveros, S. Aparicio, M. G Hernandez, *Optimized OpenCL implementation of the Elastodynamic Finite Integration Technique for viscoelastic media* Computer Physics Communications, 2014. **185**(10): p. 2683-2696.

69. Molero-Armenta, M. *SimNDT*. Available online: <https://github.com/mmolero/SimNDT>. 2017.
70. Schubert, F., et al., *The elastodynamic finite integration technique for waves in cylindrical geometries*. JASA, 1998. **104**: p. 2604-2614.
71. Schubert, F. and B. Koheler, *Three-dimensional time domain modeling of ultrasonic wave propagation in concrete in explicit consideration of aggregates and porosity*. J. Comp. Acoustics, 2001. **9**: p. 1543-1560.
72. <http://www.khronos.org/OpenGL/>, O.
73. M. Molero, L.M., D.Lliveras, MAG Izquierdo, JJ. Anaya, *Numerical simulation of ultrasonic tomography inspections of highly heterogeneous materials*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2012. **42**: p. 1-4.
74. Molero, M.S.P., Ignacio; Aparicio Secanellas, Sofía; González Hernández, Margarita; Lliveras Núñez, Dalmay; Villanueva Martínez, Eugenio; Anaya Velayos, José Javier; García Izquierdo, Miguel Ángel, *Portable non-destructive testing system for test tubes with axial symmetry of Cementitious materials by means of ultrasonic imaging, and associated method*, 2012: España. p. 42.
75. M. Molero , D.L., José Vicente Fuente, Miguel Ángel García Izquierdo, Margarita González Hernández, José Javier Anaya Velayos *Characterization of stone and cementitious materials by ultrasonic imaging*. in *11th International Conference on Non-Destructive Investigations and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of Cultural and Environmental Heritage*. 11-13 de Junio de 2014 Museo Arqueológico Nacional Madrid. España.
76. Lliveras Núñez, D., et al. *Tomografía Ultrasónica en Transmisión para Materiales Altamente Dispersivos*. in *12º Congreso Español de Ensayos No Destructivos*. 2011. Valencia. España.
77. Acebes Pascual, M., *Estudio y extensión de un modelo micromecánico trifásico para la caracterización ultrasónica de materiales compuestos*, in *Dpto. de Ing. Civil: Construcción*. 2007, Universidad Politécnica de Madrid.
78. AENOR, *UNE-CEN/TS 12390-9:2008 EX. "Testing hardened concrete - Part 9: Freeze-thaw resistance – Scaling*, 2008: Spain.
79. ASTM, *ASTM C 666/C 666M – 03. "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing"*, American Society of Testing and Materials, 2003: USA.
80. J. Ranz, D.L., H. L. Romero, M. J. Casati, M. G. Hernández. *Monitorización no destructiva del daño producido por ciclos de hielo – deshielo en hormigones*. in *12º Congreso Español de Ensayos No Destructivos*. 2011. Valencia España.
81. H. L. Romero, M.J.C., J. C. Gálvez, M. Molero, M. G. Hernández. *Deterioro del hormigón sometido a ciclos de hielo-deshielo en presencia de cloruros*. in *Anales de Mecánica de la Fractura*. 2011.
82. Nuñez, D.L., *Estudio comparativo de la tomografía ultrasónica en transmisión en materiales dispersivos y no dispersivos*, in *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales* 2011, Universidad Politécnica de Madrid: España.
83. Arduino. 2014; Available from: <http://www.arduino.cc/>.
84. Ultratek. 2009; Available from: http://www.usultratek.com/products/usb_ut350.htm.
85. AENOR, *UNE 12390-2:2009 Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests*, 2009.
86. Molero, M., et al., *Ultrasonic wave propagation in cementitious materials: A multiphase approach of a self-consistent multiple scattering model*. Ultrasonics, 2011. **51**(1): p. 71-84.

87. Hoła, J., Bień, J., Sadowski, Ł., Schabowicz, K., *Non-destructive and semi-destructive diagnostics of concrete structures in assessment of their durability.*, in *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences* 2015. p. 87.
88. Krautkramer, J., *Ultrasonic testing of materials* 1983: Springer-Verlag.
89. Kit Fook Liu, H.K.C., Nima Mehrabi, Kobayashi Yoshikazu, and Tomoki Shiotani *Condition Assessment of PC Tendon Duct Filling by Elastic Wave Velocity Mapping*. The Scientific World Journal, 2014. **2014**: p. 14.