

# **Evaluación no destructiva de materiales mediante métodos de reconstrucción tomográfica basados en redes neuronales de base radial**

*Autor:* Vicente Albert Pérez  
*Directores:* Jorge Gosálbez Castillo  
Addisson Salazar Afanador

*Lugar de trabajo:* Instituto Tecnológico de la Construcción AIDICO  
Grupo de Tratamiento de Señal GTS-UPV

Valencia, España  
Octubre 2010

## **RESUMEN**

Se presenta un nuevo método de reconstrucción tomográfica de materiales inspeccionados por ultrasonidos. Los siguientes parámetros son extraídos de la señal ultrasónica medida: velocidad de propagación, atenuación y frecuencia centroide de la señal. Estos parámetros proporcionan unos pocos valores para la tomografía del material (valores en la superficie o en determinadas localizaciones del interior del material). Los demás valores de la tomografía se obtienen a partir de un algoritmo propuesto basado en una red neuronal de funciones de base radial (RBFNN, radial basis function neural network) que utiliza como entrada los parámetros ultrasónicos. Las variables consideradas para definir la RBFNN son: ancho, peso y localización de las funciones de base radial, y número de neuronas utilizadas. La configuración óptima de las variables de la RBFNN para diferentes casos de estudio se ha obtenido mediante entrenamiento previo. Estos casos incluyeron los siguientes materiales con uno o múltiples defectos: probetas de duraluminio; y probetas de hormigón autocompactante. Los resultados fueron evaluados estimando las probabilidades de detección y falsa alarma, teniendo en cuenta el diseño original de los materiales y las tomografías obtenidas. Se ha demostrado que el método propuesto permite obtener imágenes precisas del interior de los materiales a partir de simulaciones y de experimentos reales.

## **ABSTRACT**

A new method for tomographic reconstruction of materials inspected by ultrasounds is presented. The following parameters are extracted from the measured signals: propagation velocity, signal attenuation and centroid frequency. These parameters provide a few values for the material tomography (values at the surface or at specific locations inside the material). The rest of the tomography values are obtained by means of a proposed algorithm based on radial basis function neural networks (RBFNN), which uses the ultrasonic parameters as input. The variables considered for defining the RBFNN are: width, weight and location of the RBF centers, and neuron numbers. Optimum setup of the RBFNN variables for different case studies was obtained by previous training. These cases included the following one-defect or multiple-defect materials: simulated models using finite differences; specimens of an aluminium alloy; and specimens of self-compacting concrete. The results were evaluated by estimating the detection and false alarm probabilities taking into account the material original design and the tomography obtained. It was demonstrated in simulations and real experiments that the proposed method allows precise images of the material inside to be obtained.

## ÍNDICE GENERAL

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	4
I.1. <i>Motivación</i> .....	4
I.2. <i>Objetivos</i> .....	5
I.3. <i>Planteamiento del problema</i> .....	5
I.4. <i>Materiales empleados</i> .....	6
<b>II. ESTADO DEL ARTE</b> .....	7
II.1. <i>Técnicas existentes</i> .....	7
<b>III. DESARROLLO TEÓRICO</b> .....	10
III.1. <i>Modelo de propagación</i> .....	10
III.2. <i>Predicción no lineal mediante RBF</i> .....	12
III.3. <i>Detección de heterogeneidades en imágenes tomográficas</i> .....	15
<b>IV. ANÁLISIS NUMÉRICO</b> .....	18
IV.1. <i>Métodos de simulación numérica</i> .....	18
<b>V. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b> .....	20
V.1. <i>Descripción de defectos</i> .....	20
V.2. <i>Equipamiento empleado</i> .....	22
V.3. <i>Procedimiento de medida</i> .....	22
<b>VI. RESULTADOS</b> .....	24
VI.1. <i>Razonamiento sobre los materiales</i> .....	24
VI.2. <i>Material bifásico – probetas de duraluminio</i> .....	25
VI.2.1. <i>Defecto único</i> .....	25
VI.2.2. <i>Múltiples defectos</i> .....	29
VI.3. <i>Material trifásico – bloques de hormigón autocompactante</i> .....	31
VI.3.1. <i>Múltiples defectos</i> .....	31
VI.4. <i>Validación del método</i> .....	34
VI.5. <i>Análisis y discusión</i> .....	37
<b>VII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO</b> .....	38
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	40
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	41
<b>ANEXO 1. EQUIPAMIENTO EMPLEADO</b> .....	44
<b>ANEXO 2. PUBLICACIONES</b> .....	45

## I. INTRODUCCIÓN

### I.1. *Motivación*

Es una tarea fundamental en muchas industrias, llevar a cabo una inspección profunda de determinados materiales, con el objeto de localizar su posible defectología interna, caracterizar sus propiedades mecánicas y geométricas y detectar posibles heterogeneidades.

Este trabajo de tesis se vincula al proyecto de investigación INSPECHORM realizado conjuntamente por AIDICO (Instituto Tecnológico de la Construcción) y el GTS (Grupo de Tratamiento de Señal) de la UPV. El proyecto tiene como objeto el desarrollo de nuevas metodologías de análisis para la inspección de estructuras de hormigón. Más concretamente, en una de sus tareas, recoge el desarrollo de nuevos algoritmos de reconstrucción tomográfica mediante la aplicación de técnicas no destructivas.,

El planteamiento de este trabajo de investigación surge de la necesidad de obtener cierta información en elementos constructivos cuyo interior no es accesible y no es posible proceder mediante una campaña de inspección destructiva. Dicha información relevante comprende la geometría interna y la existencia de defectos distribuidos en dichos elementos. Por todo ello, se plantea el desarrollo de un nuevo método de reconstrucción basado en inspección ultrasónica que permita analizar los materiales de una manera sencilla, tanto en laboratorio como en campo.

Cuando nos encontramos ante un material a inspeccionar -en nuestro caso se ha experimentado con duraluminio y hormigón autocompactante-, únicamente es posible acceder a las caras exteriores del mismo, por lo que a simple vista se desconoce su composición interna. Una técnica de evaluación con gran número de aplicaciones en diversos campos es la inspección ultrasónica, que se caracteriza por ser un ensayo no destructivo que no altera en manera alguna la muestra inspeccionada.

Las limitaciones propias de la inspección ultrasónica son, fundamentalmente, que mediante ésta únicamente se obtiene información de los diferentes caminos de propagación que recorre la onda mecánica a través de la muestra. Para reconstruir interiormente la totalidad de ésta, es necesaria la aplicación de un algoritmo de reconstrucción inversa basado en la interpolación de los datos para que el número de puntos representados resulte razonable.

A fin de obtener tomografías de mayor precisión y resolución, se ha optado por la implementación de un algoritmo de predicción no lineal que consiste en una red neuronal construida a partir de funciones de base radial. El entrenamiento de dicha red permite la optimización de los parámetros de dichas funciones, lo produce una mejor reconstrucción de los defectos internos.

## 1.2. *Objetivos*

Este trabajo de investigación tiene por objeto dar respuesta a la necesidad de detección y localización de defectos y heterogeneidades en el interior de determinados materiales. Para ello, se propone el desarrollo de un nuevo método de procesado de señal que se comporte como una herramienta de reconstrucción rápida y precisa de los defectos existentes en la muestra.

Mediante este trabajo de investigación buscará cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un método de reconstrucción general, aplicable a todo tipo de materiales que podamos inspeccionar mediante ultrasonidos. Los algoritmos desarrollados deben ser robustos frente a errores y precisos en la detección y localización de defectos en los materiales evaluados.
- Minimizar en la medida de lo posible, los tiempos de inspección y de procesado posterior, así como reducir el coste computacional requerido en el proceso de reconstrucción tomográfica.
- Optimizar los parámetros de las funciones de base radial que conforman la red neuronal para cada uno de los casos de análisis, cumpliendo en todo momento con los objetivos enumerados anteriormente.
- Evaluar el nuevo método desarrollado en diferentes materiales, haciendo uso para ello de figuras de mérito para verificar que se mejoran los resultados obtenidos con otros algoritmos de reconstrucción.

## 1.3. *Planteamiento del problema*

La labor fundamental de este trabajo de investigación, como se ha comentado con anterioridad, es el desarrollo de un método de reconstrucción tomográfica que sea rápido y eficaz y que pueda emplearse tanto en laboratorio como en campo. A pesar de que el proyecto de investigación INSPECHORM en el que se encuadra este trabajo se centra fundamentalmente en el hormigón, se ha pretendido desde un primer momento que los algoritmos de reconstrucción sean aplicables a cualquier tipo de material del cual se quiera conocer su composición interna.

La principal dificultad de la inspección ultrasónica viene dada por la necesidad de realizar medidas con transductores de alta frecuencia para obtener una buena resolución espacial. Sin embargo estos transductores de alta frecuencia tienen una profundidad de penetración baja, fundamentalmente en materiales tan heterogéneos como en el caso del hormigón. Por este motivo se deben emplear a transductores de baja frecuencia cuya capacidad de penetración es mayor, pero cuya resolución de inspección es menor, por lo que la reconstrucción interna de las piezas se hace complicada siendo necesario un método predictivo para llevar a cabo dicha tarea. La segunda de las dificultades radica en el elevado número de medidas necesarias para la correcta detección de pequeños defectos en el interior de los materiales.

Además, el más mínimo error en la localización de los transductores, la existencia de ruido externo en las señales, o pequeñas desviaciones en la detección de los tiempos de llegada en la recepción del pulso ultrasónico producen, en los algoritmos existentes, alteraciones en la imagen reconstruida final.

Frente a todos los problemas previamente identificados, se opta por la implementación de un método de predicción no lineal basado en redes neuronales. Estas redes poseen unos parámetros de ajuste que pueden ser optimizados para obtener una mejor reconstrucción de las muestras ensayadas. Por otra parte, las funciones de base radial, ampliamente utilizadas en otros campos para la interpolación de ciertos datos, no han sido previamente utilizadas para la realización de tomografías ultrasónicas. En este trabajo se pretende demostrar la potencialidad de las NNRBF para la reconstrucción interna de materiales, basándonos en la propagación de múltiples ondas ultrasónicas por el interior de los mismos.

#### *I.4. Materiales empleados*

Durante el desarrollo de este trabajo de investigación se han empleado dos materiales de uso ampliamente extendido, y fáciles de mecanizar, como son el duraluminio y el hormigón autocompactante. Ambos materiales presentan grandes y significativas diferencias, por lo que resultan de gran interés para el desarrollo y evaluación del nuevo método de reconstrucción tomográfica.

A continuación se detallan las características más relevantes de cada uno de ellos, si bien un análisis en mayor profundidad de sus propiedades elásticas y mecánicas será realizado en el capítulo de resultados.

##### **DURALUMINIO**

El duraluminio fue descubierto accidentalmente por el alemán Alfred Wilm en 1906. Es una aleación de aluminio con una base de magnesio. Se trata de un metal ligero, pero de gran dureza. La aleación se obtiene en la siguiente proporción: de 2,5 a 5% de cobre, 0,5 a 4% de magnesio, 4 a 6% de zinc, con silicio, hierro y el 0,1 % de titanio.

El duraluminio se corroe más que otras aleaciones, motivo por el cual se recubren ambas caras de la chapa de duraluminio con otras de aluminio. En estas condiciones se utiliza mucho en aviación. La proporción conveniente del duraluminio es del 90% al 95% de aluminio, 4,5% de cobre, 0,25% de manganeso, 0,5% de magnesio, 0,5% de hierro y 0,5% de estaño.

##### **HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE**

El Hormigón Autocompactante denominado por sus siglas (HAC), o H30AC, se emplea en hormigones vistos con geometrías complicadas, o en condiciones de vibrado difícil, en hormigones de espesores delgados, con armados densos o compuestos, o con tejido de fibras.

Se usa en prefabricados ya que permite espesores más delgados y acabados diversos. También es empleado en gunitados, hormigones proyectados para túneles, en mallas de armado en muros y superficies curvas.

El Hormigón Autocompactante o HAC posee, en relación a otros hormigones, mayor contenido de finos (cementos, áridos y adiciones en un 23% del peso total del hormigón), con la incorporación de fluidificantes que le confieren la fluidez requerida.

## II. ESTADO DEL ARTE

### II.1. *Técnicas existentes*

La tomografía computerizada es la reconstrucción obtenida mediante computador de una sección de determinado material. La imagen puede ser obtenida a partir de diferentes técnicas de inspección no destructiva, incluyendo ultrasonidos, barrido de electrones, partículas alfa, láser y radar. Por definición la tomografía de un objeto es una visualización en dos dimensiones de una lámina muy delgada del mismo [1]. 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.

La tomografía se puede dividir en dos tipos según su aplicación, tomografía por transmisión y tomografía por reflexión. 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. La tomografía por transmisión se usa fundamentalmente para la determinación de densidades, composición interna o esfuerzos residuales [2]. La técnica de tomografía ultrasónica fue desarrollada en 1963 [3], [4] y se basaba en la obtención de una función real en una región finita de un plano mediante la determinación de sus integrales de línea. El problema responde a la siguiente función matemática  $f_L = \int_L g(s) ds$  donde  $g(s)$  representa un coeficiente lineal que varía de punto a punto en la región  $D$ ,  $f_L$  corresponde al sumatorio final a lo largo de  $s$ , siendo  $s$  la distancia a lo largo de la línea recta  $L$  que atraviesa  $D$ .

Dentro de la tomografía por transmisión, encontramos el método de transiluminación ultrasónica que se ha empleado ampliamente en sistemas de inspección sónica y georradar (GPR-Ground Penetrating Radar) [5] y [6]. 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.

En discontinuidades suavizadas el haz ultrasónico puede ser transmitido y reflejado. De esta manera se pueden considerar dos tipos de tomografía ultrasónica. La tomografía por reflexión es análoga a la inspección ultrasónica por pulso eco, mientras que la tomografía por transmisión se

corresponde a la inspección ultrasónica por transmisión. Igualmente, la tomografía por transmisión puede ser dividida en dos tipos dependiendo de las propiedades del material bajo análisis.

Si la velocidad ultrasónica a través del material es constante, entonces la atenuación en cada píxel es el parámetro a calcular, igual que en la tomografía mediante rayos X. Si la atenuación tiene un valor reducido a lo largo del volumen, entonces la velocidad en cada píxel es el parámetro a calcular. El valor de  $T_K$  en el límite exterior corresponde a la absorción total para el primer caso y a la velocidad total para el segundo.

Ambas caras del material deben ser accesibles y la resolución lateral viene determinada por la resolución lateral de los transductores emisor y receptor.

### **Tomografía por reflexión**

La tomografía por reflexión es la técnica en la cual los ecos procedentes del “backscattering” de un volumen situado mas 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 [7].

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 procedentes del “backscattering” 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.

### **Tomografía Doppler**

En tomografía Doppler, un amplío (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 Doppler 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 y, por lo tanto es una técnica de ancho de banda estrecho y alta sensibilidad. A partir de las variaciones en la amplitud ha sido posible obtener buenos resultados tomográficos. Al incluir datos de fase en la reconstrucción, se obtienen mejores resultados mediante esta técnica que aquellos obtenidos mediante una simple inspección B-scan a la misma frecuencia. [8], [9], [10]



### **SAFT- Técnica de Apertura Sintética de Focalización**

La técnica de SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) es una técnica de reconstrucción asistida por ordenador para la detección y caracterización de discontinuidades. 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 [11]. 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.

La técnica de SAFT requiere de procesadores potentes y dispositivos avanzados de hardware de representación. Sin embargo, presenta la gran ventaja de obtener una sencilla representación visual a partir de un elevado número de señales [12]. SAFT puede generar imágenes sin ambigüedades producidas por superficies refractivas irregulares y puede eliminar la borrosidad ocasionada por la dispersión angular que ocurre en las discontinuidades .

### **Aplicaciones de la tomografía ultrasónica**

La tomografía ultrasónica tiene un gran número de aplicaciones en la inspección no destructiva, incluyendo evaluación de objetos complejos en 3 dimensiones, componentes ensamblados, detección de discontinuidades, tamaño y localización de dichas discontinuidades.

La viabilidad de un sistema de tomografía ultrasónica ha sido demostrada para el análisis de esfuerzos en acero a partir del tiempo de llegada del pulso ultrasónico y técnicas de reconstrucción algebraicas [13], [14]. La técnica consiste, como se ha comentado previamente, en un método iterativo inverso del cual se obtiene el valor para las velocidades que mejor ajusta las ecuaciones. El método iterativo converge de manera mínimo cuadrática. Para esfuerzos de compresión la velocidad decrece mientras que crece para esfuerzos de tensión. Este incremento/decremento de la velocidad supone alrededor de un 3 %.

Otras aplicaciones típicas de la tomografía ultrasónica son la determinación de espesores, localización de artefactos, detección de fallas y defectos. En [15] se aplica la inspección ultrasónica a la detección de defectos y oquedades en el interior de bloques de piedra ornamental. Además, se puede encontrar múltiple bibliografía respecto a la aplicación de la tomografía ultrasónica en diferentes campos como son: la medicina, la soldadura metálica, la energía (plantas de energía eléctrica, reactores nucleares, inspección de oleoductos y gasoductos...), el transporte (carreteras, ferrocarril, aeronáutica, automoción...), las estructuras (puentes, edificios, túneles...), la industria química, la metalurgia (inspección de aceros, aluminio y otras aleaciones), o las inspecciones en servicio de tanques a presión, turbinas, tuberías... [16], [17], [18], [19], [20]

### **Aplicaciones de las redes neuronales con funciones de base radial**

Por otra parte, las redes de funciones de base radial (del inglés, RBF) corresponden a redes neuronales que son empleadas como un tipo particular de funciones de aproximación que son entrenadas para obtener mejores resultados de ajuste. Las redes RBF han sido objeto de un

creciente interés desde su aparición [21], [22], encontrándose en la actualidad un gran número de resultados numéricos y experimentales disponibles.

Las aplicaciones más comunes en las cuales se han empleado las redes neuronales basadas en funciones de base radial (NNRBF) se encuentran en el campo de los sistemas digitales de comunicación. Diferentes autores han aplicado las RBF en sistemas de codificación-decodificación. En [23], emplearon las RBF para el desarrollo de un decodificador adaptativo en un sistema de modulación implementado mediante código de Trellis.

Por otra parte, los estudios llevados a cabo en [24], [25], tienen por objeto la utilización de RBF para la modelización e identificación adaptativa de sistemas no lineales. Las RBF también se emplean en el campo de las comunicaciones digitales para la detección de fallos en redes de acceso [26], empleando para ello aprendizaje automático y empleando como entrada de la red neuronal algunos parámetros de las líneas telefónicas.

Finalmente, las redes RBF pueden ser empleadas en el reconocimiento automático de esquemas de modulación, identificación y estándares inalámbricos. Estas tareas tienen una aplicación directa en el diseño de receptores inalámbricos reconfigurables, [27]. Este tipo de aplicaciones son de creciente interés en la actualidad debido a la proliferación de nuevos servicios de telecomunicación basados en los estándares de comunicación GSM y UMTS.

El creciente desarrollo de redes neuronales basadas en RBF en el campo de los sistemas de comunicación digitales ha permitido su aplicación en otros campos. Se puede encontrar en la actualidad múltiple bibliografía de aplicación de las RBF en problemas de mapeo, clasificación y aproximación no lineal.

Algunos campos en los cuales las RBF resultan de gran interés en la actualidad son los siguientes: sistemas de control y seguridad, procesamiento del lenguaje, visión y procesado de imágenes, reconocimiento de patrones, estadística, reconocimientos de rostros, sensores, clasificación de imágenes, predicción...

Más recientemente, las redes neuronales basadas en funciones de base radial se han aplicado en la resolución del problema inverso de reconstrucción tomográfica [28] para la sensorización de turbulencias en fluidos. De igual forma, en [29] se propuso también un sistema basado en RBFs, pero en este caso para la obtención de tomografías aplicando la técnica de la capacitancia eléctrica.

### **III.DESARROLLO TEÓRICO**

#### *III.1.Modelo de propagación*

Los métodos ultrasónicos forman parte del conjunto de ensayos no destructivos, ampliamente empleados en la evaluación de microestructuras, en la obtención de propiedades mecánicas de los materiales y en la detección de discontinuidades internas. La inspección ultrasónica se lleva a cabo fundamentalmente mediante dos técnicas, que son la de transmisión y la de pulso-eco. Para la

primera de ellas se emplean dos transductores ultrasónicos centrados en una determinada frecuencia y configurados como emisor y receptor, mientras que en la segunda el mismo transductor actúa como emisor y recibe posteriormente las ondas reflejadas en las discontinuidades del interior del material.

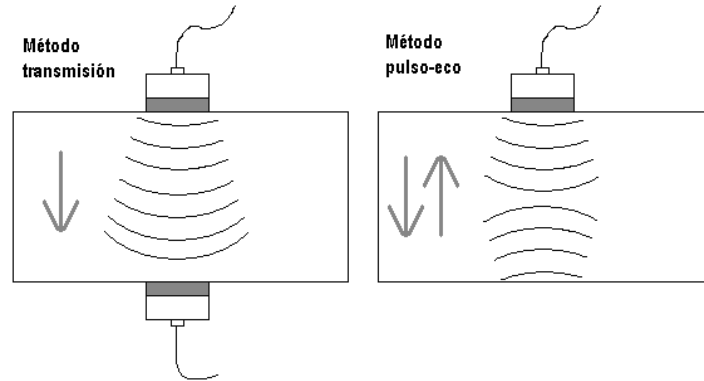


Fig. 1. Métodos básicos de inspección ultrasónica

Los ultrasonidos son un tipo de perturbación tensional en forma de onda acústica centrada a una frecuencia por encima del espectro audible (20 KHz). La presión acústica de un onda elástica responde a la siguiente ecuación, denominada “ecuación de onda” [30]:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

siendo  $p$  la presión acústica,  $c$  la velocidad de propagación de la onda en el medio y  $t$  el tiempo.

Cuando dicha onda presenta una velocidad angular  $\omega=2\pi f$ , la presión acústica se puede escribir de la siguiente forma, separando las componentes espacial y temporal.

$$p(r,t) = P(r) \cdot e^{j\omega t} \quad (2)$$

Si sustituimos este valor de presión acústica en la ecuación de onda anterior, sin tener en cuenta la contribución temporal llegamos a la “ecuación de Helmholtz”:

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0 \quad (3)$$

donde  $k=\omega/c=2\pi/\lambda$

La ecuación de onda, en su forma 1 o 3, es únicamente integrable, y por tanto presenta solución única para geometrías sencillas y medios homogéneos ( $c$  y  $k$  constantes). En el caso en que la ecuación de onda no es integrable, no se puede obtener una solución exacta y se debe recurrir a métodos de diferencias finitas o elementos finitos, que permiten obtener una solución numérica aproximada para dicha ecuación. En el punto IV.1 se comentan en mayor detalle los algoritmos numéricos empleados en la simulación de ondas elásticas.

La ecuación de onda anterior, se plantea suponiendo que no se encuentran fuentes acústicas en el interior de la región de interés. Sin embargo, cuando se tiene una fuente puntual en  $r_0$ , la ecuación de onda se reescribe de la siguiente manera:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -4\pi A \delta(\vec{r}_0) e^{j\omega t} \quad (4)$$

cuya solución en el punto  $\vec{r}$  es de la siguiente forma:

$$p(\vec{r}, t) = \frac{A}{|\vec{r} - \vec{r}_0|} e^{(j\omega t - k|\vec{r} - \vec{r}_0|)} \quad (5)$$

En el caso en que no se trate de una fuente puntual, sino que se trate de una superficie radiante, la presión acústica se puede obtener discretizando en diferentes fuentes puntuales e integrando finalmente todas ellas.

### ***Parámetros extraídos de la 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 a partir del tiempo de llegada del pulso ultrasónico. La detección del pulso de llegada en la señal temporal se puede llevar a cabo mediante diferentes métodos, entre ellos el de umbral, el de máximos o el de doble corte por cero. A partir del tiempo detectado y el espesor de la muestra inspeccionada se calcula la velocidad ultrasónica como  $v=d/\Delta t$ .

***Atenuación:*** El pulso ultrasónico transmitido sufre una pérdida en amplitud a medida que se propaga por el interior de un determinado material. El coeficiente de atenuación define esa pérdida por unidad de longitud. Esta atenuación es de tipo exponencial y se debe fundamentalmente a la absorción de ultrasonidos por el medio, así como a las reflexiones producidas por las heterogeneidades presentes en la muestra [31].

***Frecuencia centroide:*** La frecuencia centroide es una herramienta de procesamiento digital de señal mediante la cual se puede caracterizar el espectro de una señal ultrasónica. La obtención del espectro se lleva a cabo a partir de la transformada de Fourier que permite pasar del dominio del tiempo al de la frecuencia [32], [33]. La frecuencia centroide se puede definir como el centro de gravedad de un espectro y se presenta en la siguiente ecuación:

$$f_c = \frac{\sum_{k=0}^{N/2} X[k] \cdot k}{\sum_{k=0}^{N/2} X[k]} \cdot \frac{1}{N} \cdot f_s \quad (6)$$

donde

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j2\pi \frac{k}{N} n} \quad \text{para } k \in [0, N-1] \quad (7)$$

### ***III.2. Predicción no lineal mediante RBF***

Las redes neuronales artificiales (en adelante RNA) son una herramienta de procesamiento matemático basadas en el funcionamiento de las redes neuronales que forman el sistema nervioso de los

animales. Las RNA tienen características propias de las redes biológicas, y se han venido empleando fundamentalmente en el tratamiento de la información.

La arquitectura típica de una RNA esta formada por una serie de neuronas de entrada  $X$ , que se interconectan entre si mediante una “función de propagación o excitación”. En una segunda etapa, se aplica una “función de activación” sobre el valor previo obtenido y se actualiza la neurona de salida  $Y$ . Las funciones de activación más típicas son la función sigmoidea y la híper parabólica.

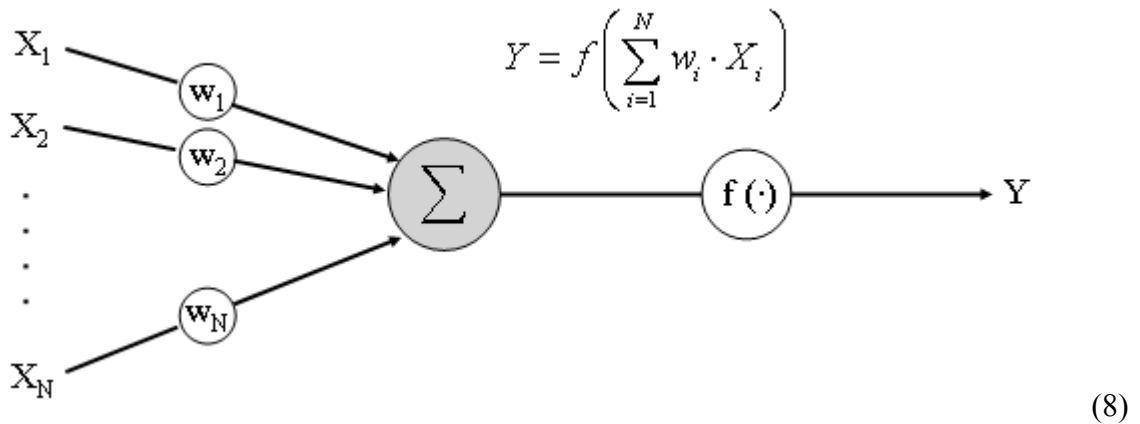


Fig. 2. Arquitectura típica de una red neuronal artificial

La interconexión de las diferentes neuronas que conforman nuestra red, se lleva a cabo principalmente, mediante una suma ponderada. La obtención de la red que mejor se adapta a la resolución del problema planteado, se consigue mediante optimización de los diferentes parámetros de la red (fundamentalmente los pesos  $w_i$  de la función de propagación).

Un caso particular de RNA es la denominada red de funciones de base radial, empleada fundamentalmente para la aproximación de funciones. El funcionamiento de esta red, es similar al comentado anteriormente, con la salvedad de que son dichas funciones de base radial (en adelante RBF), las empleadas como función de activación de la red neuronal. Las RBF se encuentran en la bibliografía con diferentes nomenclaturas:

$$\phi(x) \equiv \phi(x, c, r) \equiv \phi\left(\frac{\|x - c\|}{r}\right) \quad (9)$$

siendo  $x$  un punto del espacio de entrada,  $c$  el centro de la RBF y  $r$  su radio. Las funciones de base radial cuyo uso se encuentra más extendido son las siguientes: gaussiana, multicuadrática, spline poliharmónica, thin-plate spline...

Las redes de funciones de base radial se han empleado, en el presente trabajo de investigación, para el desarrollo de un nuevo algoritmo de reconstrucción tomográfica. Este nuevo método se basa en la obtención de una función estimada para los diferentes parámetros extraídos de las señales ultrasónicas. La función estimada se escribe, en forma analítica, como la suma ponderada de

funciones gaussianas centradas en  $X_{cj}$  y se puede replantear en forma matricial, minimizando de esta manera el coste computacional del algoritmo.

$$\hat{f}(X) = \sum_{j=1}^{Nr} W_j \cdot e^{-k|X-X_{cj}|^2} \Rightarrow \hat{f}(X) = W\Phi(X) \quad (10)$$

Nr=Número de funciones en base radial

Wj=Pesos de ponderación de las funciones de base radial

Xcj=Centros de las diferentes funciones de base radial

k=Anchura de la función de base radial

Si atendemos únicamente a la velocidad de transmisión ultrasónica en el medio, el valor que se pretende estimar es aquel de la velocidad en un punto del interior del material inspeccionado. En la siguiente ecuación se propone que la velocidad ultrasónica puede ser aproximada por una red de funciones de base radial de la forma:

$$\hat{v}(X) = W \cdot \Phi(X) \quad (11)$$

Por otra parte, la velocidad obtenida a partir de los tiempos de llegada de la onda ultrasónica que se propaga por el material, representa el valor medio de la velocidad a lo largo de dicha muestra para un determinado camino que comienza en  $X_1$  y termina en  $X_2$ .

$$V = \frac{1}{L} \int_{X_1}^{X_2} \hat{v}(x) \cdot dx = \frac{1}{L} W \int_{X_1}^{X_2} \Phi(x) \cdot dx \quad (12)$$

Si consideramos  $\Omega(X) = \int_{X_1}^{X_2} \Phi(x) \cdot dx$ , sustituyendo en la ecuación anterior, se puede despejar el valor de los pesos óptimos que mejor se adaptan a las velocidades medias medidas.

$$W = (\Omega^T \Omega)^{-1} \Omega^T V L \quad (13)$$

Una vez obtenidos los pesos óptimos, se trata únicamente de recalculer el mapa de las velocidades instantáneas en el interior de la muestra inspeccionada, empleando para ello la ecuación 9, mediante la cual se obtiene la matriz de velocidades estimadas a partir de los parámetros ajustados para las funciones de base radial.

El entrenamiento de la red, consiste en ajustar diferentes parámetros de las funciones de base radial que mejor se adaptan al problema de reconstrucción inversa que tratamos de resolver. Estos parámetros, son fundamentalmente, los pesos (comentados anteriormente), el ancho de las RBF y la distribución de los centros. A modo de ejemplo, es lógico pensar que en zonas próximas a un defecto se deba intensificar el número de centros de las RBF y disminuir el ancho de las mismas, para obtener una mayor definición de dicho defecto.

Basándose en el comportamiento de estas redes neuronales artificiales, se ha implementado dos algoritmos de procesamiento NNRBF-2D y 3D, capaces de obtener una imagen tomográfica reconstruida inversamente a partir de la inspección ultrasónica de las piezas analizadas.

### III.3. Detección de heterogeneidades en imágenes tomográficas

Una vez obtenidas las velocidades correspondientes a los puntos intermedios de la matriz, es interesante localizar la presencia o no de heterogeneidades. Desde el punto de vista de procesamiento de señal este es un problema de detección en el cual debemos decidir la presencia o no de heterogeneidades. El problema de detección dependerá del número de hipótesis posibles, partiendo del más reducido con únicamente dos hipótesis como puede ser detectar la presencia o no de una señal en un fondo de ruido, hasta N hipótesis, como podría ser el reconocimiento de diferentes palabras por un sistema automático.

Centrándonos en la aplicación partiríamos de dos hipótesis  $H_0$  y  $H_1$ , donde  $H_0$  indicaría presencia de heterogeneidad, mientras que la hipótesis  $H_1$  estaría asociada al estado de normalidad. La expresión (14) modela este planteamiento, donde  $m_{H_i}$  corresponde al nivel medio de cada clase o hipótesis,  $H_i$ , mientras que  $w$  corresponde a un ruido blanco gaussiano aditivo de media nula y varianza  $\sigma^2$ . La variable de observación,  $x$ , se modela como una variable aleatoria donde su función de densidad de probabilidad (FDP),  $p(x)$ , se construye a partir del teorema de probabilidad total según (15), donde  $p(x; H_0)$  o  $p(x; H_1)$  son las FDP condicionadas a cada hipótesis,  $H_i$ , y  $P(H_i)$  es la probabilidad de cada hipótesis.

$$\begin{aligned} H_0 : x &= m_{H_0} + w \\ H_1 : x &= m_{H_1} + w \end{aligned} \quad (14) \quad p(x) = P(H_0)p(x; H_0) + P(H_1)p(x; H_1) \quad (15)$$

En la Fig. 3b se muestra la tomografía de velocidades obtenida como resultado de las RB en una probeta real (Fig. 3.a). A partir de esta tomografía, se estiman los diferentes parámetros que modelan el comportamiento de los datos:  $p(x)$ ,  $p(x; H_i)$ ,  $P(H_i)$  y varianza,  $\sigma^2$ , del ruido  $w$  y los cuales se muestran en la Tabla I y Fig. 4. En dichos valores, se aprecia que el valor medio de la hipótesis  $H_1$ , es lógicamente mayor que el de la hipótesis  $H_0$ .

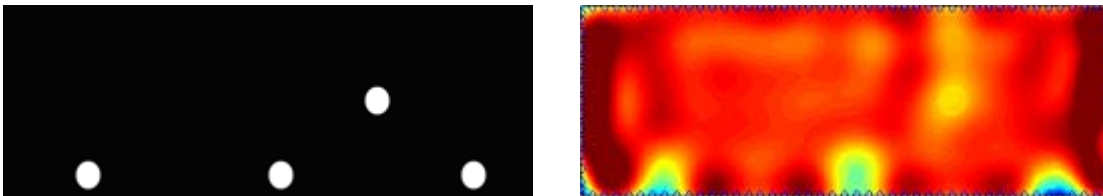


Fig. 3. a) Representación de la probeta real, b) Reconstrucción tomográfica de la probeta

Bajo este planteamiento de hipótesis binarias, el test óptimo se construye según (14), donde  $\gamma$  es el umbral que determinará la probabilidad de falsa alarma (PFA) así como la probabilidad de detección (PD). La complejidad del detector estará relacionada íntimamente con el conocimiento que tengamos de la señal así como del ruido en términos de sus FDP. El umbral se puede escoger

atendiendo a diversos criterios, como puede ser la minimización de la PFA (Neyman-Pearson) (17), la minimización de la varianza intraclases (método de Otsu) (18) o la minimización de la probabilidad de error total (enfoque bayesiano) (19).

$$\begin{aligned}
 m_{H_0} &= 3570,7 \text{ m/s} \quad , \quad m_{H_1} = 3850,8 \text{ m/s} \\
 \sigma^2 &= 5212,8 \\
 P(H_0) &= 0,0324 \quad , \quad P(H_1) = 0,9676 \\
 p(x; H_0) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-m_{H_0})^2}{2\sigma^2}} \\
 p(x; H_1) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-m_{H_1})^2}{2\sigma^2}} \\
 p(x) &= P(H_0)p(x; H_0) + P(H_1)p(x; H_1)
 \end{aligned}$$

TABLA I. AJUSTE DE P(X) A LOS DATOS REALES

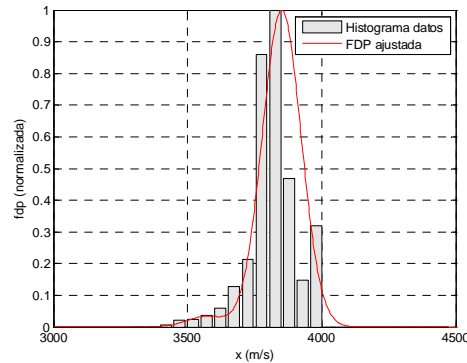


Fig. 4. Ajuste de p(x) a los datos reales

Para el primer método basado en el test de Neyman-Pearson (14) y bajo el modelo ajustado para los datos, las expresiones analíticas de PFA y PD se pueden escribir como (17), donde cabe destacar la conversión del umbral  $\gamma$  en  $\gamma'$ , en el cual el primero,  $\gamma$ , se emplea en el cociente de FDPs, mientras que el segundo,  $\gamma'$ , se emplea directamente sobre la variable de observación,  $x$ . En la Figura 5 se muestran las curvas PFA( $\gamma'$ ) y PD( $\gamma'$ ) tanto teóricas como prácticas donde se aprecia el correcto ajuste de las mismas.

$$\begin{aligned}
 \frac{p(y; H_1)}{p(y; H_0)} > \gamma \quad (16) \quad PFA(\gamma) &= P\left\{ \frac{p(x; H_1)}{p(x; H_0)} > \gamma; H_0 \right\} = P\{x > \gamma'; H_0\} = 1 - \int_{-\infty}^{\gamma'} p(x; H_0) dx \\
 & PD(\gamma) = P\left\{ \frac{p(x; H_1)}{p(x; H_0)} > \gamma; H_1 \right\} = P\{x > \gamma'; H_1\} = 1 - \int_{-\infty}^{\gamma'} p(x; H_1) dx \quad (17) \\
 \gamma' &= f(\gamma) = \frac{2\sigma^2 \ln(\gamma) + (m_{H_1}^2 - m_{H_0}^2)}{2(m_{H_1} - m_{H_0})}
 \end{aligned}$$

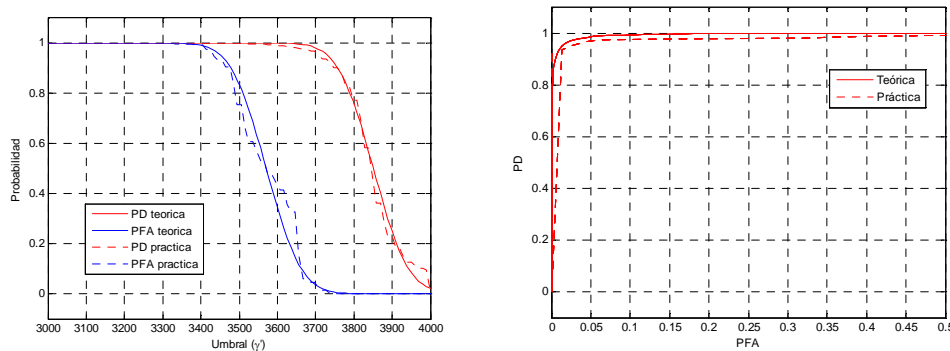


Fig. 5. Curvas PFA y PD en función de  $\gamma'$  para el test de Neyman-Pearson

El segundo caso basado en el método de Otsu estima el umbral para minimizar la varianza intraclases ( $\sigma_w^2(\gamma)$ ). Para ello, es necesario reescribir las expresiones de las probabilidades y



funciones de densidad de probabilidad en función del umbral escogido, tal y como se recoge en (18). En la Figura 7 vemos como en función del umbral  $\gamma$ , la varianza intraclase varía, presentando un umbral óptimo de  $\gamma$  igual a 3829 para el ajuste teórico que es aproximadamente el mismo que para el caso práctico, 3822.

$$\begin{aligned}
 & \begin{matrix} H_1 \\ > \\ x & \gamma & \text{siendo } \gamma_{opt} = \arg \left\{ \min_{\gamma} \sigma_w^2(\gamma) \right\} \\ < \\ H_0 \end{matrix} \\
 \sigma_w^2(\gamma) &= P_{\gamma}(H_0)\sigma_{H_0}^2(\gamma) + P_{\gamma}(H_1)\sigma_{H_1}^2(\gamma) \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{H_i}^2(\gamma) \rightarrow \text{Varianza de la clase } H_i \text{ en función de } \gamma \\ P_{\gamma}(H_i) \rightarrow \text{Prob. de la clase } H_i \text{ en función de } \gamma \end{array} \right. \\
 P_{\gamma}(H_0) &= \int_{-\infty}^{\gamma} p(x)dx = F_X(\gamma) \quad , \quad P_{\gamma}(H_1) = \int_{\gamma}^{\infty} p(x)dx = 1 - F_X(\gamma) \\
 \sigma_{H_0}^2(\gamma) &= \int_{-\infty}^{\gamma} (x - m_{\gamma, H_0})^2 p(x; x < \gamma) dx = \int_{-\infty}^{\gamma} (x - m_{\gamma, H_0})^2 \frac{p(x)}{F_X(\gamma)} dx \\
 \sigma_{H_1}^2(\gamma) &= \int_{\gamma}^{\infty} (x - m_{\gamma, H_1})^2 p(x; x > \gamma) dx = \int_{\gamma}^{\infty} (x - m_{\gamma, H_1})^2 \frac{p(x)}{1 - F_X(\gamma)} dx \\
 m_{\gamma, H_1} &= \int_{-\infty}^{\infty} x p(x; x > \gamma) dx = \int_{\gamma}^{\infty} x \frac{p(x)}{1 - F_X(\gamma)} dx \quad , \quad m_{\gamma, H_0} = \int_{-\infty}^{\infty} x p(x; x < \gamma) dx = \int_{-\infty}^{\gamma} x \frac{p(x)}{F_X(\gamma)} dx \\
 F_X(x) &= \int_{-\infty}^x p(\lambda) d\lambda = P(H_0)F\left(\frac{x - m_{H_0}}{\sigma}\right) + P(H_1)F\left(\frac{x - m_{H_1}}{\sigma}\right)
 \end{aligned} \tag{18}$$

El último método analizado se basa en un método Bayesiano, el cual minimiza la probabilidad de error total (Pe) ajustando el umbral,  $\gamma$ , (19).

$$\begin{aligned}
 & P_e(\gamma) = P\{H_0; H_1\}P(H_1) + P\{H_1; H_0\}P(H_0) \\
 & P(H_i; x) = \frac{p(x; H_i)P(H_i)}{\sum_j p(x; H_j)P(H_j)} \quad H_i = \arg \left\{ \max_i P(H_i; x) \right\} \\
 & PFA = P\{H_0; H_1\} = P\left\{ \frac{P(H_1; x)}{P(H_0; x)} > 1; H_0 \right\} = P\left\{ \frac{p(x; H_1)}{p(x; H_0)} > \frac{P(H_0)}{P(H_1)}; H_0 \right\} \\
 & PD = P\{H_1; H_1\} = P\left\{ \frac{P(H_1; x)}{P(H_0; x)} > 1; H_1 \right\} = P\left\{ \frac{p(x; H_1)}{p(x; H_0)} > \frac{P(H_0)}{P(H_1)}; H_1 \right\}
 \end{aligned} \tag{19}$$

Las expresiones de PFA y PD son similares a las del test Neyman-Pearson, salvo que el umbral,  $\gamma$ , está optimizado para minimizar Pe siendo su valor de  $\gamma = P(H_0)/P(H_1)$ . Particularizando para los datos concretos de la aplicación tendríamos  $\gamma = 0.0324/0.9676 = 0.0335$ , el cual se aproxima con la curva de Fig. 7 según:  $\gamma = f^{-1}(\gamma) = f^{-1}(3646) = 0.031$ .

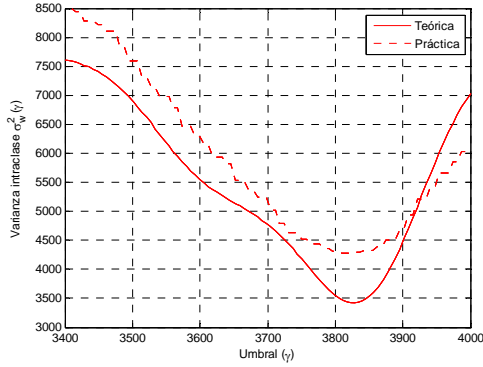


Fig. 6. Varianza intraclase vs  $\gamma$  (método de Otsu)

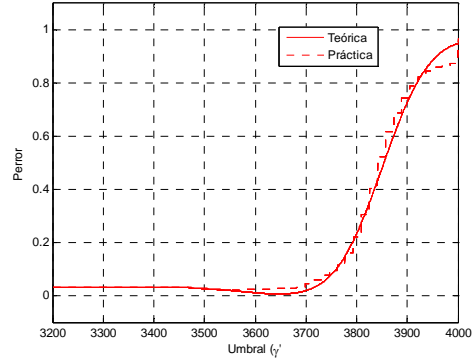


Fig. 7. Probabilidad de error vs  $\gamma'$  (Bayesiano)

Analizando las necesidades de cada uno de los métodos, vemos que el método de Otsu tiene un comportamiento autónomo al no requerir un patrón de entrenamiento como ocurre con el método de Neyman-Pearson o el método Bayesiano. Es por ello, que se empleará el método de Otsu a la hora de escoger el umbral para la segmentación de las tomografías.

## IV. ANÁLISIS NUMÉRICO

### IV.1. Métodos de simulación numérica

El nuevo método de reconstrucción tomográfica desarrollado se ha validado inicialmente mediante simulación numérica de la propagación de ondas ultrasónicas. Para ello se ha empleado el programa WAVE© de modelización de ondas elásticas mediante diferencias finitas, válido para trabajar en 2 y 3 dimensiones.

El software emplea el método de las diferencias finitas que se basa en la discretización del dominio de simulación. Se sustituyen las diferentes derivadas de la ecuación de onda por un sistema de ecuaciones lineales y se obtiene una solución numérica aproximada de la ecuación de onda acústica para dos y tres dimensiones [34].

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \left[ \mu + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla^2 w + \left[ \lambda + \mu + \phi \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\eta}{3} \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla (\nabla g w) \quad (20)$$

donde  $\rho$ =densidad material [kg/m<sup>3</sup>]  $\lambda=1^a$  constante de Lamé [N/m<sup>2</sup>,  $\mu=2^a$  constante de Lamé,  $\eta$ =viscosidad transversal [N.s/m<sup>2</sup>] y  $\phi$ =viscosidad volumen [N.s/m<sup>2</sup>].

Se comienza por definir geoméricamente un corte de la muestra del material sobre el que se pretende simular la propagación acústica de las ondas ultrasónicas. Se realizan simulaciones para el duraluminio y el hormigón autocompactante y se definen una serie de defectos en el interior de los mismos, consistentes en cavidades de diferente tamaño, posición y localización.

Previamente a la elaboración de las muestras a ensayar, se definieron una serie de defectos generales con el objeto de evaluar diferentes parámetros del método de reconstrucción

implementado, tales como la resolución, las probabilidades de detección y de error, el número de puntos de medida necesarios... En un segundo conjunto de simulaciones, se simularon diferentes cortes correspondientes a las probetas de duraluminio y hormigón autocompactante ya fabricadas.

La simulación de ondas ultrasónicas en muestras de hormigón autocompactante y duraluminio se ha llevado a cabo a diferentes frecuencias de análisis, con diferente disposición y número de transductores emisores y receptores, incluso en algunos casos se ha introducido una fuente de ruido en las señales con la idea de validar la capacidad de adaptación del método frente a pequeños errores propios de la inspección ultrasónica real.

Las muestras de duraluminio han sido simuladas con pulsos centrados en frecuencias de 10MHz, 1MHz y 500KHz. En primer lugar se definen los puntos que actuarán como emisor del pulso ultrasónico, definido en nuestro caso como un semi-seno de duración 50ns, 500ns y 1 $\mu$ s, respectivamente. Para los puntos receptores se define la geometría de los transductores y se define el tipo de datos adquiridos (aceleración en nuestro caso).

A continuación se establecen las características elásticas y mecánicas de los diferentes materiales empleados. Cabe destacar que no se han tenido en cuenta los parámetros de amortiguamiento de los materiales. Las propiedades definidas para cada material han sido las constantes elásticas de Lamé y la densidad, a partir de las cuales se puede obtener tanto la velocidad longitudinal como la transversal para el duraluminio, el hormigón y el aire.

Características material	Duraluminio	Hormigón autocompactante	Aire
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2700	2000	1.24
lambda (MPa)	22380	4470	0.14674
mu (MPa)	28484	12587	0
VL (m/s)	5421.08	3849.94	344.004
VT (m/s)	3248.02	2508.69	17.3788

TABLA II. TABLA DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN ACÚSTICA

Finalmente, se definen los diferentes parámetros numéricos necesarios para comenzar la simulación. Entre estos parámetros cabe destacar el paso temporal, la máxima frecuencia de análisis, la longitud de onda mínima y el tiempo de simulación.

El paso temporal se define automáticamente por el software a partir del tamaño de malla (en nuestro caso, 1 mm) y la velocidad ultrasónica de los materiales, determinando la estabilidad de la simulación. La frecuencia máxima se define como la frecuencia central del pulso ultrasónico generado. A partir de este valor se establecen unos márgenes para la longitud de onda mínima a resolver, y finalmente, el usuario define el tiempo de simulación. Cabe destacar que los valores de estos parámetros resultan determinantes para la resolución, la precisión y la estabilidad de la simulación.

Las aceleraciones temporales obtenidas para cada uno de los puntos en que se ha colocado un receptor, se exportan a un fichero de texto separado por comas, que se importa en MATLAB© para su posterior procesamiento. Los resultados obtenidos mediante el método NNRBF sobre las probetas simuladas se presentan en las secciones VI.3 y VI.4.

## V. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### V.1. Descripción de defectos

Las probetas de duraluminio utilizadas presentan dimensiones de 220x70x50. La primera de las probetas a inspeccionar presenta un único defecto localizado en la posición (190mm, 10mm), a partir del origen de coordenadas definido en el vértice superior izquierdo de la pieza. Se trata de un orificio cilíndrico sin rellenar, pasante a través de la pieza y de diámetro 10mm.

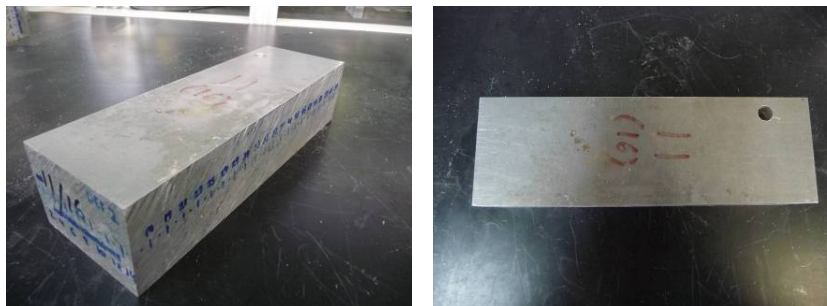


Fig. 8. Único defecto en probeta de duraluminio 2

El segundo de los defectos, introducido en la probeta de duraluminio 3 consiste en un único agujero pasante de características idénticas al anterior (mismo diámetro y profundidad) que se encuentra centrado en la posición (70mm, 35mm).

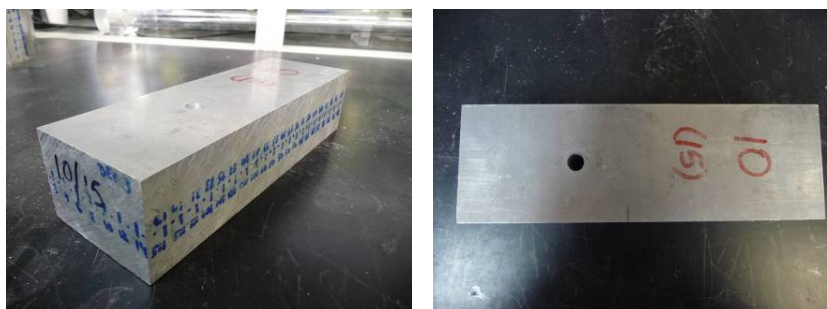


Fig. 9. Único defecto introducido en la probeta de duraluminio 3

Por último, en la probeta número 4 se introducen un total de cuatro defectos verticales cilíndricos que no llegan a ser pasantes. La profundidad de los orificios es de 30mm, su diámetro es de 10mm, y sus respectivas posiciones son las siguientes: (35,62), (115,62), (155,35) y (195,62).

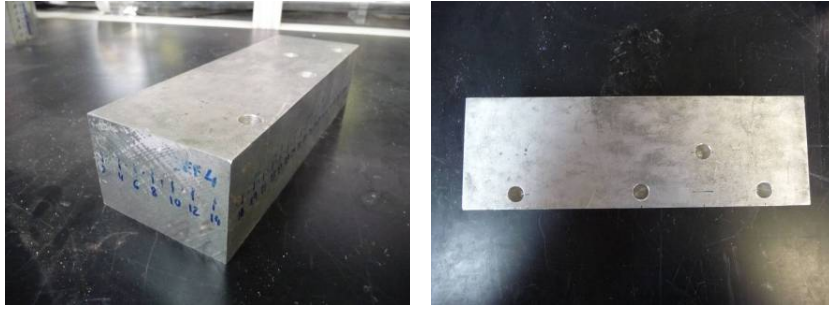


Fig. 10. Defectos múltiples introducidos en la probeta de duraluminio 4

En el caso de las probetas de hormigón autocompactante se han empleado dos tipos de hormigón diferentes y se ha tenido que proceder de manera distinta al caso de las probetas de duraluminio. En la fase de elaboración del hormigón se ha hecho uso de un encofrado al cual se han fijado los defectos para la obtención de la pieza deseada. Como se observa en la figura 11 se han empleado diferentes formas, disposiciones y tamaños.



Fig. 11. Proceso de elaboración de probetas de hormigón autocompactante con defectos

Para el primero de los hormigones autocompactantes empleados se han realizado 2 probetas con diferentes defectos. En la primera de ellas se introduce un tubo de pvc de 30 mm de diámetro en la posición (65,65), y un segundo tubo de pvc de 40 mm de diámetro centrado en la posición (270,265).

La segunda de las piezas de este hormigón autocompactante presenta un defecto rectangular de dimensión 185x90 en la posición (145,40) y un segundo defecto en forma de agujero pasante inclinado de 40mm de diámetro en (65,250)



Fig. 12. Probetas de hormigón autocompactante 1 y 2

Con el segundo de los hormigones autocompactantes (en este caso blanco), también se han construido dos piezas. Los defectos introducidos en la primera de ellas consisten en un corte rectangular de dimensiones 153x50 en la posición (235,140) y un cilindro inclinado pasante de dimensión 50x40 centrado en (135,80). La segunda pieza, por otra parte, presenta 4 orificios

pasantes, 3 de ellos de 25mm de diámetro centrados en  $(72'5, 77'5)$ ,  $(277'5, 172'5)$  y  $(127'5, 252'5)$  y otro de diámetro 40mm en  $(230, 120)$ .



Fig. 13. Probetas de hormigón autocompactante 3 y 4

### V.2. Equipamiento empleado

El equipamiento ultrasónico utilizado en la campaña experimental fue el siguiente; en primer lugar, un equipo pulser/receiver capaz de generar un pulso ultrasónico configurable por el usuario y de adquirir la señal recibida por el transductor ultrasónico de recepción y, en segundo lugar, palpadores ultrasónicos centrados en diferentes frecuencias de 500KHz, 1MHz y 10MHz.

Los transductores ultrasónicos empleados son el V101 de PANAMETRICS (centrado en 500KHz), el K10K (10MHz) y el K1SC (1MHz) de Krautkramer. El K10K ha sido el empleado en las probetas de duraluminio, mientras que el K1SC y el V101 se han empleado en las probetas de hormigón. El acoplamiento de estos palpadores ultrasónicos es por contacto empleando gel.

Por otro lado, la generación y adquisición del pulso ultrasónico se lleva a cabo mediante el pulser/receiver DPR300 de JSRULTRASONICS. Este pulser ultrasónico tiene como principales características: bajo nivel de ruido en recepción (en torno a  $49\mu V$ ), ancho de banda de 35 MHz, pulso ajustable en amplitud (hasta 475V), energía e impedancia, filtros paso alto y paso bajo configurables y una ganancia en recepción de 80 dB.

En el anexo I se describen el resto de especificaciones técnicas relativas al equipamiento empleado.

### V.3. Procedimiento de medida

La campaña de medidas experimentales llevadas a cabo para la obtención de las señales ultrasónicas incluye la inspección de probetas de duraluminio y de hormigón autocompactante. Puesto que previamente a la campaña experimental se ha simulado una batería de probetas de ambos materiales, se ha podido validar el método y determinar el número y posición idóneos de los transductores ultrasónicos que permitan reconstruir tomográficamente las muestras mediante el nuevo método de procesado basado en redes de funciones de base radial.

En primer lugar, para las probetas de duraluminio de 22x7x5 centímetros se han tomado 116 y 56 puntos para los transductores ultrasónicos emisores y receptores, respectivamente.

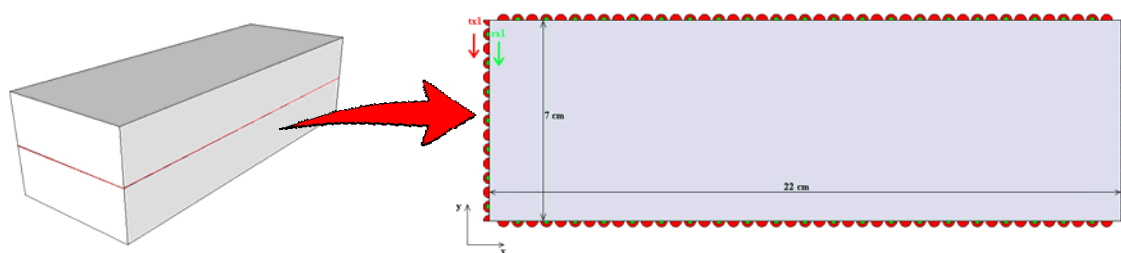


Fig. 14. Disposición de transductores transmisor y receptor en probetas de duraluminio

El procedimiento de medida ha sido el siguiente: se ha procedido a realizar la medida ultrasónica para todos los caminos de propagación enfrentados, realizando 116 medidas donde los transductores se encontraban alineados. Dadas las dificultades encontradas en la reconstrucción de las probetas con múltiples defectos, tal y como se comentará en mayor detalle en el capítulo de resultados, se procede para dicha probeta 4 de duraluminio a realizar una inspección con desalineamiento de los transductores. Para esta configuración el receptor se fija en una posición barriéndose la cara opuesta con el transmisor.

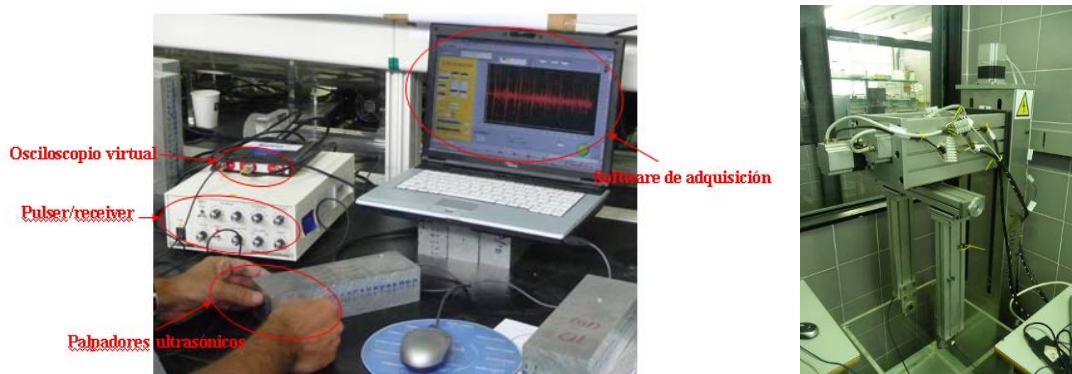


Fig. 15. Configuración del ensayo para las probetas de duraluminio (manual y automático)

En la figura 15 (imagen de la izquierda) se puede observar la probeta de duraluminio, inspeccionada mediante los palpadores de 10 MHz, el equipo de ultrasonidos, un osciloscopio virtual y un programa desarrollado en LABVIEW© mediante el cual se controlan externamente el pulser y el osciloscopio. En la imagen de la derecha se observa un sistema automático de inspección ultrasónica por inmersión de la muestra en agua. Este sistema permite un mayor número de puntos de inspección con una resolución de 1 mm.

En segundo lugar, para las probetas de hormigón autocompactante se ha procedido de manera análoga, con la salvedad, de que el hormigón es un material más atenuante y dispersivo por lo que su inspección debe llevarse a cabo con transductores de más baja frecuencia que presentan una mayor energía de penetración. Los transductores empleados han sido por tanto los de 1MHz y 500 KHz. Para las probetas de hormigón, de 33'5x31'5x35, se colocan 40 puntos receptores y para cada uno de ellos se barre la cara enfrentada al mismo con el palpador transmisor.

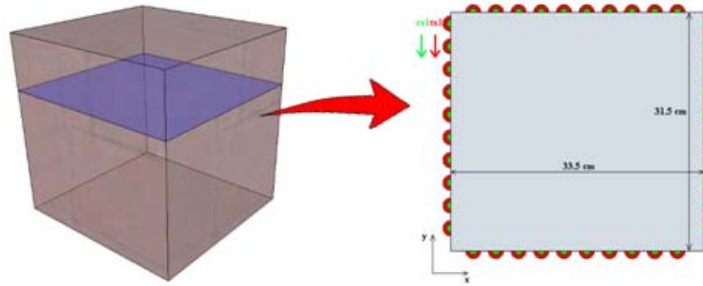


Fig. 16. Disposición de transductores transmisor y receptor en probetas de hormigón

El montaje empleado para la inspección ultrasónica de las muestras de hormigón autocompactante consta igualmente del pulser ultrasónico, los transductores de ultrasonidos (en este caso de 500 KHz y 1 MHz), un osciloscopio con mayor resolución del convertidor A/D y un software de adquisición que permite adquirir las señales del osciloscopio mediante RS-232.

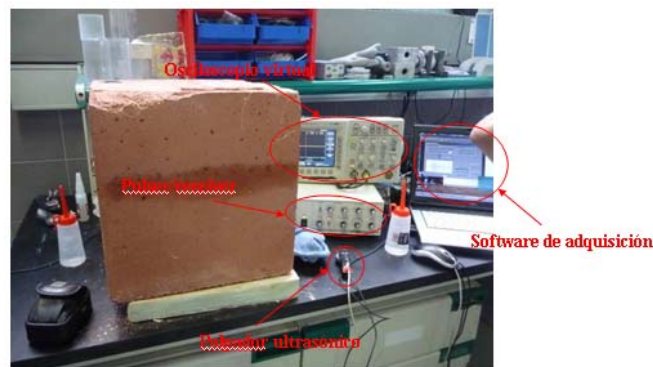


Fig. 17. Configuración del ensayo para las probetas de hormigón autocompactante

De las señales ultrasónicas obtenidas se extraído las diferentes características empleadas como entrada de la red neuronal, tales como la velocidad, la atenuación o la frecuencia centroide. A partir de estos valores, se ha entrenado la red y se han optimizado los parámetros de las funciones de base radial empleadas para interpolar la información en el interior de la muestra y generar la imagen final reconstruida tomográficamente.

## VI. RESULTADOS

### VI.1. Razonamiento sobre los materiales

El duraluminio y el hormigón autocompactante son dos materiales ampliamente empleados, y que presentan un comportamiento muy diferente frente a los ultrasonidos. El duraluminio es una aleación muy homogénea con una impedancia ultrasónica muy constante a lo largo de todo el material. El hecho de introducir un defecto de aire en el duraluminio introduce una discontinuidad que refleja y refracta el pulso ultrasónico. Esta refracción se traduce en una modificación de diferentes parámetros de la señal ultrasónica recibida. Como se verá más adelante, la introducción



de un defecto en forma de aire produce cambios importantes en la velocidad, la atenuación y el espectro.

Por otra parte, el hormigón autocompactante es un material que contiene una cierta dosificación de árido y cemento. El cemento a su vez también contiene áridos más finos; la distribución de estos áridos en el proceso de fraguado del material contribuye, además, a la formación de pequeños poros en el interior de la muestra, con lo que la impedancia ultrasónica es más heterogénea, dependiendo de la región de análisis. Dado que el hormigón es un material muy atenuante y dispersivo, se debe recurrir a transductores ultrasónicos de baja frecuencia que mejoran la capacidad de penetración, siendo así la velocidad el parámetro de reconstrucción empleado.

## VI.2. Material bifásico – probetas de duraluminio

### VI.2.1. Defecto único

#### **Resultados simulaciones**

Para las probetas de duraluminio con un solo defecto se ha tomado un corte longitudinal de las mismas a la mitad de su altura, como se puede observar en las imágenes siguientes, y se ha procedido a simular numéricamente la propagación de una onda ultrasónica longitudinal en su interior.

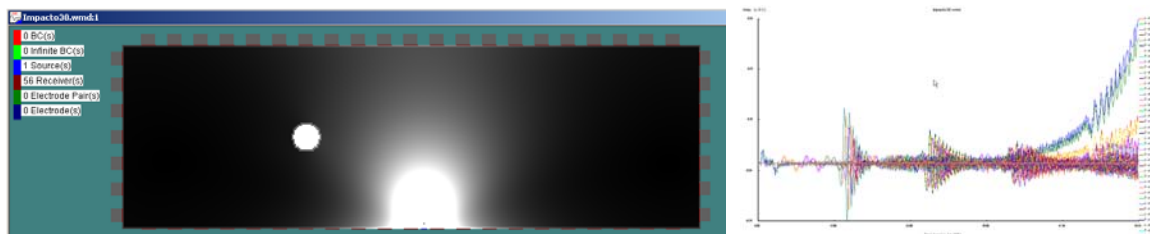


Fig. 18. Simulación de la propagación de una onda ultrasónica a través del duraluminio

Aplicando el algoritmo NNRBF-2D desarrollado se ha obtenido la imagen reconstruida a partir de las velocidades medidas.

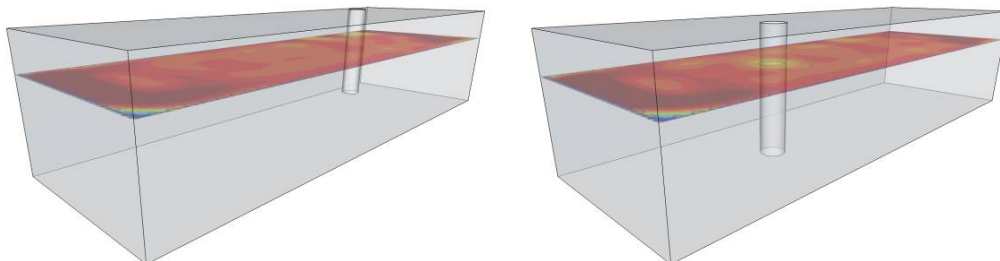


Fig. 19. Representación esquemática 3D de las muestras de duraluminio simuladas con 1 defecto

Como se observa en la figura 19, la tomografía bidimensional de las probetas de duraluminio se realiza a partir de un corte longitudinal de la misma. En las simulaciones, el corte se ha realizado a la mitad de la altura de la probeta, es decir a 2,5 cm, obteniéndose los siguientes resultados:



Fig. 20. Geometría de las muestras de duraluminio simuladas con 1 defecto

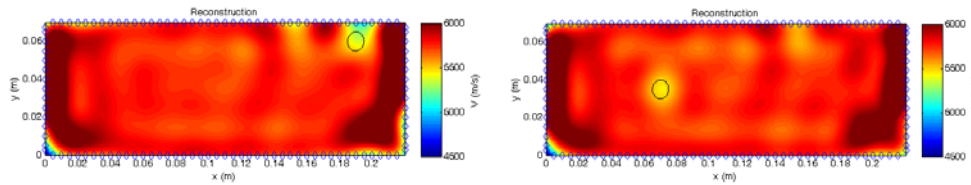


Fig. 21. Tomografía NNRBF de muestras de duraluminio simuladas con 1 defecto

La figura 21 muestra las imágenes reconstruidas tomográficamente mediante NNRBF. La presencia de un defecto de aire en la probeta provoca que la velocidad ultrasónica en el medio disminuya hasta un orden de 400-600 m/s. La localización del defecto y su dimensionamiento resultan correctos a primera vista. La evaluación final se ha realizado mediante la obtención de figuras de mérito que representen la probabilidad de detección frente a la de falsa alarma.

Cabe comentar que se han obtenido velocidades más altas de lo que cabría esperar en los bordes de la probeta. Esto es debido a que no se dispone de suficiente información en dichas zonas, por no existir caminos de propagación ultrasónica que atraviesen estos puntos. Por este motivo, se produce un error numérico de reconstrucción al procesar la información en estas regiones.

A continuación, se ha procedido de forma análoga con la simulación de las dos probetas, en 3D, empleando el algoritmo de reconstrucción NNRBF-3D, cuyo resultado se muestra a continuación en la forma de 11 cortes a diferentes alturas de la muestra.

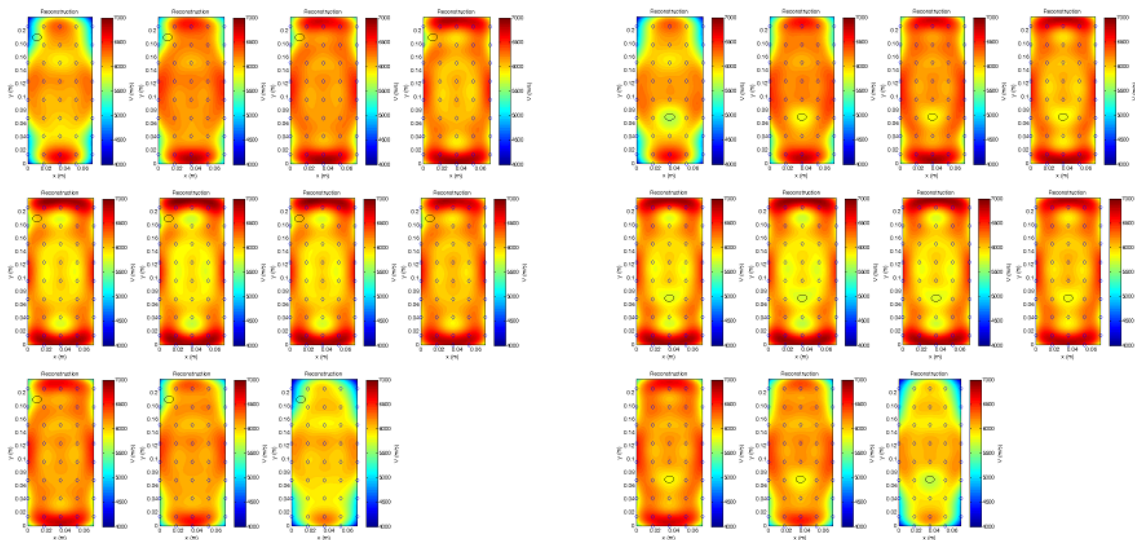


Fig. 22. Tomografía 3D NNRBF de muestras de duraluminio simuladas con 1 defecto

Puesto que la probeta de duraluminio tiene 5 centímetros de altura, los 11 cortes se representan desde la parte superior hacia la inferior en pasos de 0,5 centímetros. En la figura 22 se observan los

diferentes cortes para las probetas de duraluminio con un solo defecto cilíndrico de 1 centímetro de diámetro.

### **Resultados experimentales**

La inspección, tanto manual como automática, de las diferentes probetas de duraluminio con un solo defecto da lugar a un conjunto de señales ultrasónicas, a partir de las cuales se pueden extraer los diferentes parámetros que se emplean en el posterior procesamiento matemático mediante el algoritmo NNRBF. Como se puede observar en las figuras 23 a 26 estos parámetros incluyen la atenuación, la frecuencia centroide o la velocidad calculada por diferentes métodos (umbral y doble corte por cero).

La muestra 1 de duraluminio ha sido inspeccionada experimentalmente mediante ultrasonidos de manera manual (figura 23) y automática (figura 24). Las diferentes imágenes reconstruidas corresponden nuevamente a los cortes longitudinales de la muestra a una altura de 2,5 cm y han sido obtenidas mediante el algoritmo NNRBF-2D. Los parámetros de entrada empleados por la red neuronal han sido la atenuación, la frecuencia centroide, y la velocidad del pulso ultrasónico.

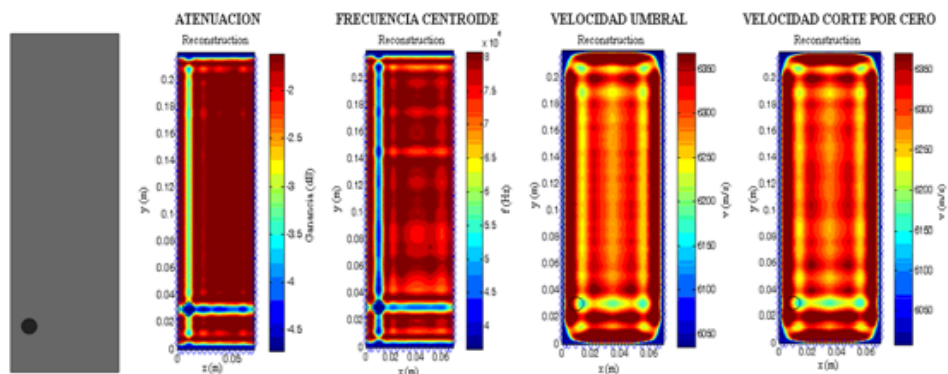


Fig. 23. Tomografía 2D NNRBF de muestra de duraluminio 1 (inspección manual)

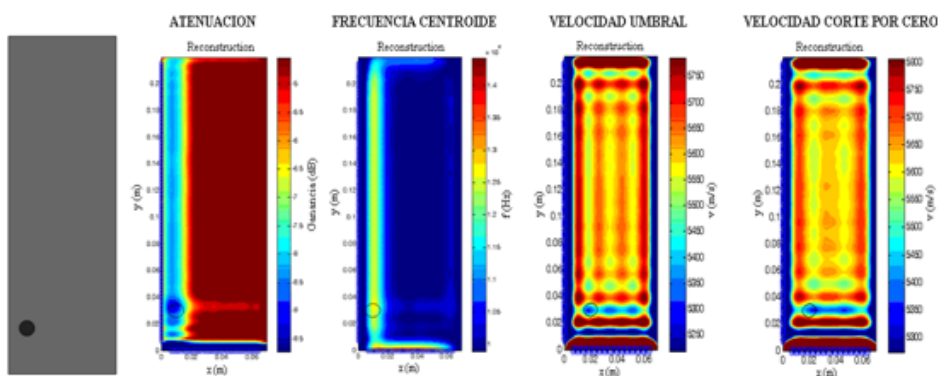


Fig. 24. Tomografía 2D NNRBF de muestra de duraluminio 1 (inspección automática)

A partir de los resultados obtenidos, se puede observar que la inspección ultrasónica manual produce una imagen reconstruida más nítida a pesar de tener una resolución espacial menor que la inspección ultrasónica automática. Esto se debe fundamentalmente a que los transductores

ultrasonicos empleados son de 500 KHz, siendo la resolución de análisis menor y el ancho del pulso mayor a medida que se propaga por el agua y la muestra, debido a la dispersión.

La inspección ultrasónica manual emplea un menor número de puntos de medida pero, debido a que la frecuencia central de los transductores es de 10 MHz, se consigue una resolución mayor. Sin embargo, se puede observar en las diferentes imágenes reconstruidas algunas zonas de sombra introducidas por los defectos. Esto genera artefactos que no se encuentran presentes realmente y que aparecen por la disposición de los transductores en la medida. Cuando se introduce un cierto desalineamiento entre los transductores emisor y receptor se consigue eliminar este efecto.

Procediendo de manera análoga con la muestra 2 de duraluminio se obtienen las imágenes reconstruidas tomográficamente mediante NNRBF-2D a partir de la atenuación, la frecuencia centroide y la velocidad de propagación del pulso ultrasónico. La muestra 2 ha sido también inspeccionada mediante un sistema manual y otro automático.

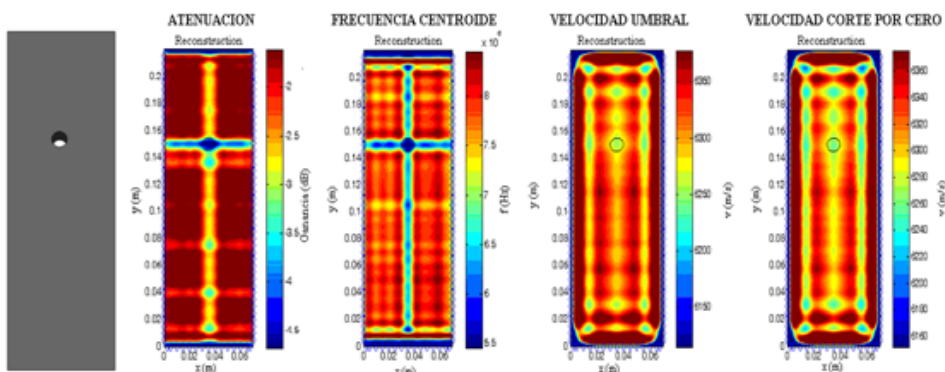


Fig. 25. Tomografía 2D experimental NNRBF de muestra de duraluminio 2 (inspección manual)

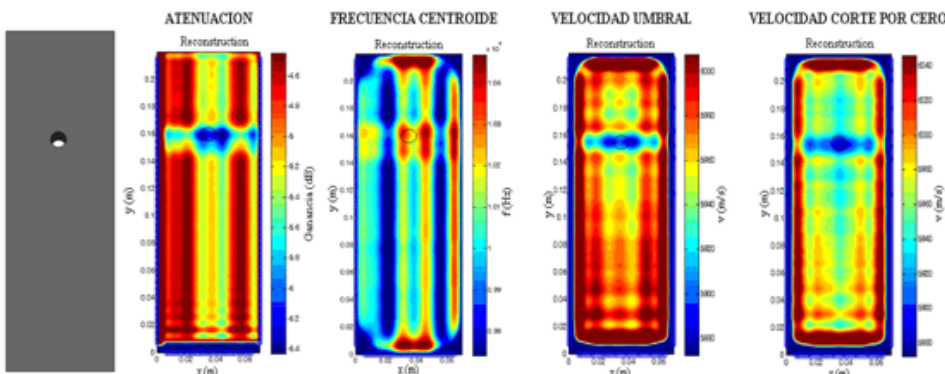


Fig. 26. Tomografía 2D experimental NNRBF de muestra de duraluminio 2 (inspección ultrasónica)

Como se ha podido observar en las diferentes imágenes reconstruidas, los parámetros más sensibles y que mejor resolución presentan para el caso de las probetas de duraluminio son la atenuación del pulso ultrasónico y la frecuencia centroide, dado que el contraste de este parámetro en zonas con aire respecto a zonas con duraluminio es mayor que para el caso de la velocidad ultrasónica, dado que el pulso ultrasónico consigue bordear el defecto.

La inspección de estas probetas se ha llevado siempre a cabo para caminos de propagación en los cuales transmisor y receptor se encuentran enfrentados y correctamente alineados, de otra

manera los parámetros de atenuación y frecuencia centroide serían más difíciles de reconstruir ya que dependerían de la distancia de una forma cuadrática o de orden mayor.

### VI.2.2. Múltiples defectos

#### Resultados simulaciones

La siguiente pieza de duraluminio simulada presenta 4 defectos cilíndricos no pasantes de 1 centímetro de diámetro. La simulación se ha llevado a cabo mediante transductores ultrasónicos de 10 MHz y la reconstrucción tomográfica se ha realizado mediante los algoritmos NNRBF para dos y tres dimensiones. El algoritmo NNRBF-2D realiza la reconstrucción a partir de las velocidades obtenidas. Se trata de un corte longitudinal de la muestra, como se puede ver en las figuras 27 y 28.

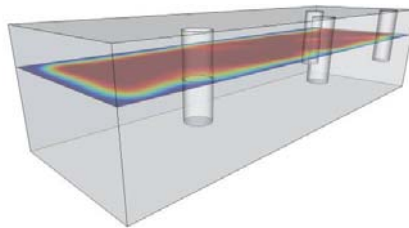


Fig. 27. Representación esquemática 3D de la muestra de duraluminio simulada con 4 defectos

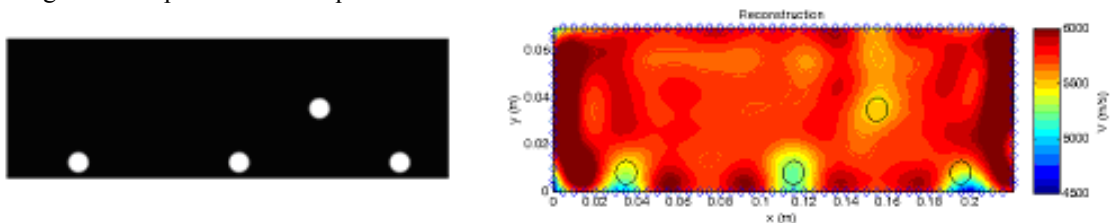


Fig. 28. Geometría y tomografía NNRBF-2D de la muestra de duraluminio simulada con 4 defectos

Por otro lado, el algoritmo de reconstrucción NNRBF-3D genera los diferentes cortes a partir de las velocidades ultrasónicas obtenidas mediante simulación. En la figura 29 se muestran los 11 cortes para diferentes alturas desde los 5 a los 0 centímetros en pasos de 0,5 cm. Al ser no pasantes, los 4 defectos cilíndricos presentes en la muestra de duraluminio únicamente se pueden apreciar en los cortes correspondientes a los 5 cm hasta los 2 cm de altura.

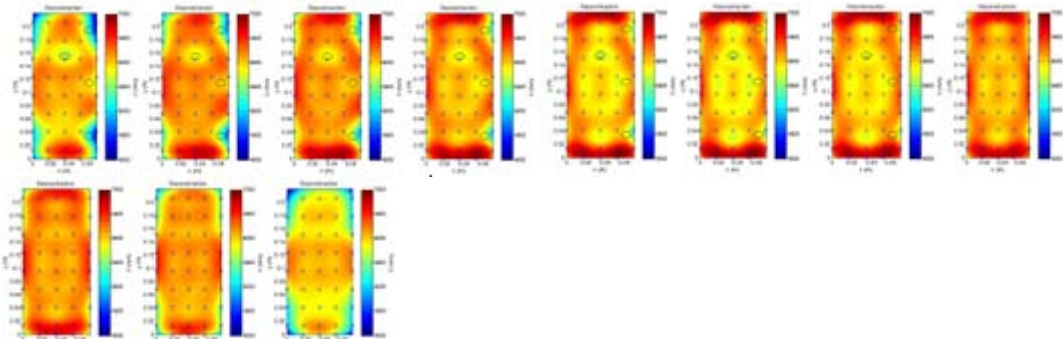


Fig. 29. Tomografía NNRBF-3D de muestra de duraluminio simulada con 4 defectos

**Resultados experimentales**

La inspección ultrasónica en probetas de duraluminio con varios defectos se ha llevado a cabo, tanto de forma manual (con transductores de 10 MHz), como automatizada (mediante una máquina automática de inspección ultrasónica con transductores de 500 KHz y acoplamiento por agua). El alineamiento entre los transductores ultrasónicos transmisor y receptor produce artefactos en las “zonas de sombra” de los defectos en la imagen reconstruida que no corresponden a defectos reales. Esto se debe a la ausencia de caminos cruzados en el interior de la pieza.

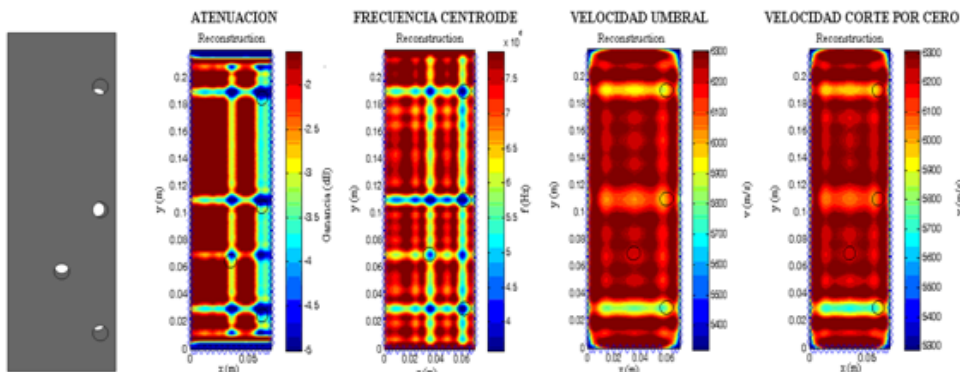


Fig. 30. Tomografía 2D experimental NNRBF de muestra de duraluminio 3 (inspección manual)

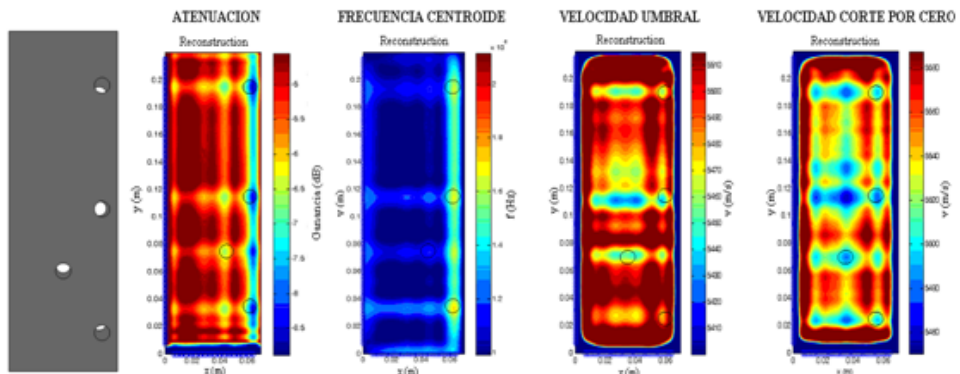


Fig. 31. Tomografía 2D experimental NNRBF de muestra de duraluminio 3 (inspección automática)

La inspección ultrasónica manual vuelve a dar mejores resultados que la inspección automática debido a los mismos motivos comentados con anterioridad. A fin de eliminar estos artefactos producidos en las zonas de sombra de las imágenes reconstruidas, la muestra de duraluminio 3 ha sido inspeccionada de forma manual haciendo uso del método de transiluminación (ver Sección II.1). Para ello, se fija el receptor en un punto de medida, y se hace un barrido mediante el transductor emisor, obteniendo el resultado siguiente por medio del algoritmo NNRBF-2D.

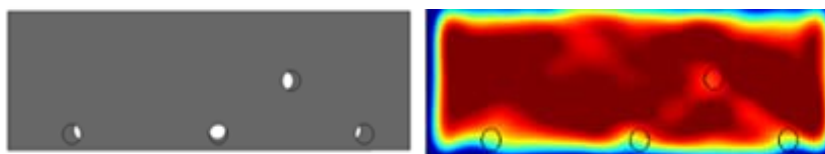


Fig. 32. Tomografía 2D experimental NNRBF de muestra de duraluminio 3 (método manual de transiluminación ultrasónica)

La figura 32 representa la imagen reconstruida tomográficamente mediante NNRBF-2D, a partir de las velocidades ultrasónicas obtenidas en los diferentes caminos. Se ha conseguido limpiar los artefactos existentes en la imagen tomográfica que se debían al método de medida inicial, pudiéndose distinguir correctamente los defectos cilíndricos presentes en la muestra. Los defectos próximos al borde de la probeta son más difíciles de distinguir, puesto que se encuentran en zonas con menos caminos de propagación ultrasónica.

### VI.3. *Material trifásico – bloques de hormigón autocompactante*

El siguiente material en el cual se ha evaluado el algoritmo de reconstrucción tomográfica NNRBF, ha sido el hormigón autocompactante. Este material produce dificultades añadidas, dado que su composición interna hace que el pulso ultrasónico este sometido a una gran atenuación y dispersión a medida que se propaga.

#### VI.3.1. *Múltiples defectos*

##### **Resultados simulaciones**

La simulación de las probetas de hormigón autocompactante (HAC) se ha llevado a cabo para las frecuencias 500KHz y 1MHz. Un corte horizontal a 2/3 de la altura total de las diferentes piezas de hormigón autocompactante fabricadas con defectos ha sido simulado. Los defectos introducidos en la muestra han sido cilíndricos y rectangulares pasantes a través de la pieza, y en algunos casos con una cierta inclinación.

Se han inspeccionado dos tipos de hormigón autocompactante diferentes. El tipo I de HAC, empleado en las muestras 1 y 2, es un HAC35 de color rojo, mientras que el tipo II de HAC, empleado en las muestras 3 y 4, corresponde a un hormigón blanco desarrollado por el departamento de materiales cementantes de AIDICO en otro proyecto de investigación.

Las imágenes de la figura 33 corresponden a las tomografías obtenidas con el algoritmo NNRBF-2D, a partir de la velocidad ultrasónica medida en el medio mediante la inspección con los palpadores de 500KHz y 1MHz.

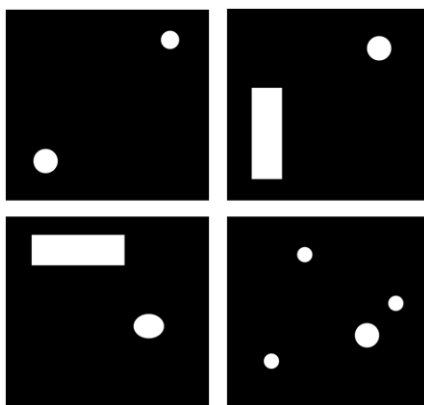


Fig. 33. Geometría de las muestras de hormigón autocompactante con defectos reales

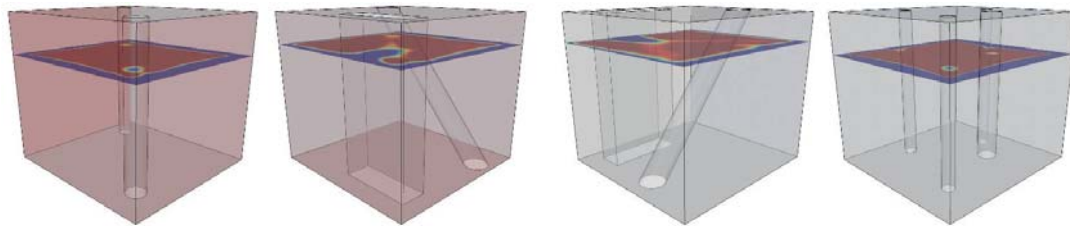


Fig. 34. Reconstrucción 3D tomográfica NNRBF de las probetas de HAC tipo I y II

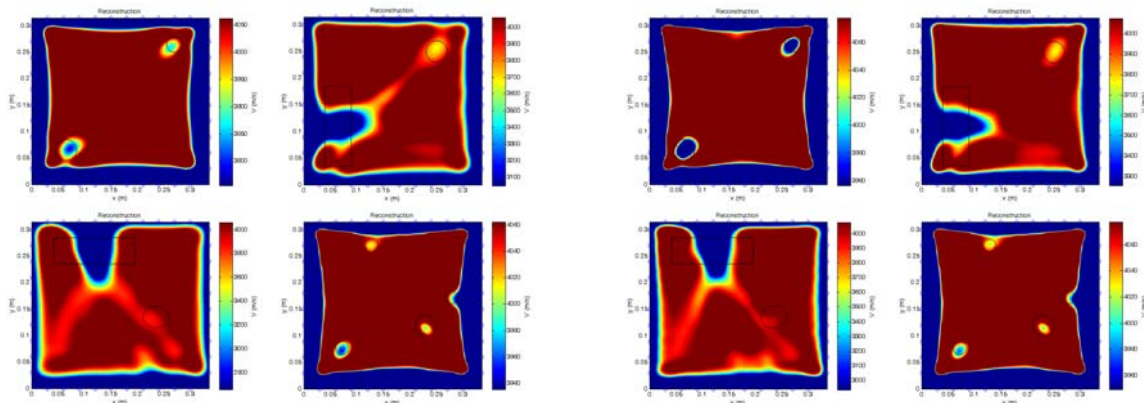


Fig. 35. Tomografías 2D probetas de HAC simuladas para 1MHz (izq.) y 500KHz (der.)

Las tomografías se han obtenido a partir de la velocidad ultrasónica, ya que la atenuación y la frecuencia centroide en el HAC están sometidas a efectos de filtrado y de dispersión producidos por el propio material que impiden la correcta reconstrucción de los defectos.

Por otra parte, en la figura 35, se observan resultados muy similares para las dos frecuencias de inspección ultrasónica. Esto es debido al filtrado paso bajo que sufre el pulso ultrasónico al atravesar el hormigón. Este filtrado provoca que la frecuencia central del pulso recibido sea la misma para ambos palpadores, siendo esta frecuencia la que determina la resolución final de la imagen reconstruida.

Además, cabe indicar, que los defectos rectangulares, resultan más difíciles de reconstruir debido a la propia naturaleza de las funciones gaussianas de base radial empleadas, y generan zonas de sombra de una gran extensión, ya que su tamaño impide la correcta recepción del pulso ultrasónico en los puntos más próximos a estos defectos.

### **Resultados experimentales**

Para la campaña de medidas experimentales, se ha procedido a la inspección ultrasónica en un corte a una altura de 2/3 de la pieza, obteniéndose un corte horizontal del bloque de hormigón autocompactante, tal como se puede observar en las figuras 36 a 39. El método empleado ha sido el de transiluminación y las señales se han procesado para obtener la velocidad ultrasónica en los diferentes caminos de propagación. A partir de las velocidades obtenidas se ha aplicado el



algoritmo NNRBF-2D de reconstrucción inversa para determinar la tomografía de cada una de las piezas.

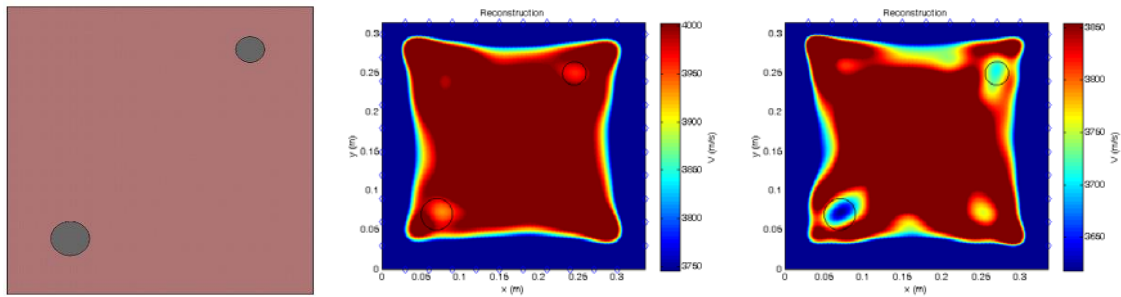


Fig. 36. Tomografía 2D experimental NNRBF de muestra 1 de HAC (1MHz, der. y 500KHz, izq.)

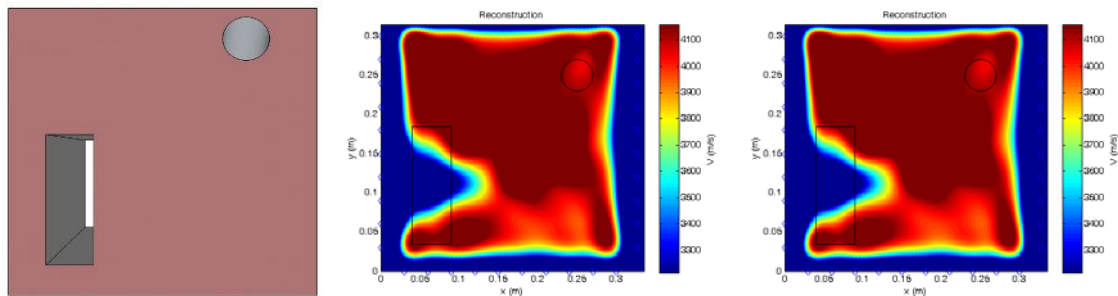


Fig. 37. Tomografía 2D experimental NNRBF de muestra 2 de HAC

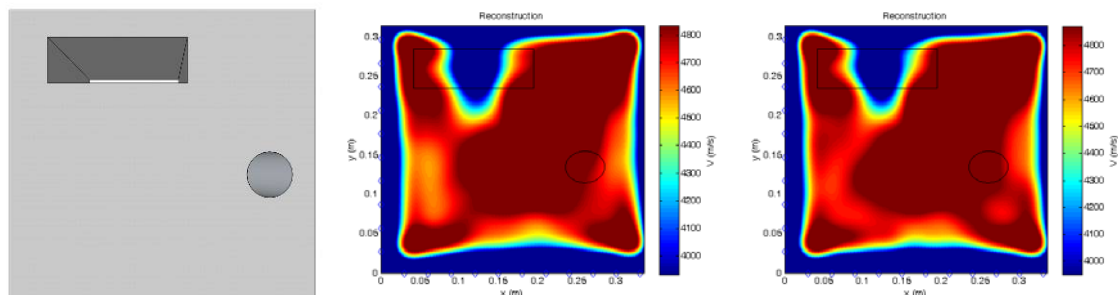


Fig. 38. Tomografía 2D experimental NNRBF de muestra 3 de HAC

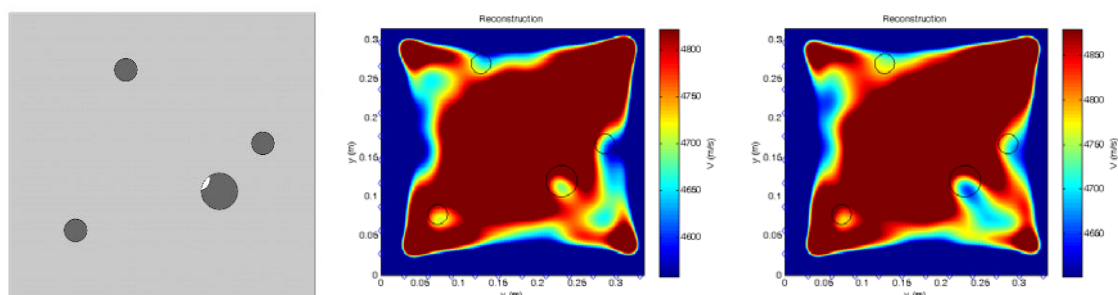


Fig. 39. Tomografía 2D experimental NNRBF de muestra 4 de HAC

Como se comentó en el capítulo V, a diferencia del duraluminio, el hormigón es un material más dispersivo, más atenuante y de una mayor porosidad, por lo que los valores de atenuación y frecuencia centroide no resultan ser parámetros sensibles a la presencia de defectos. Las variaciones debidas a los defectos quedan enmascaradas por las variaciones producidas por las propias características del hormigón inspeccionado.

Además, como se observa en las figuras 36 a 39 la resolución y precisión de las tomografías es inferior a aquellas obtenidas mediante simulación, debido fundamentalmente a que el modelo simulado de HAC es un modelo simplificado que no tiene en cuenta la composición multi-fásica del hormigón, y las diferentes etapas en la hidratación del mismo.

#### VI.4. Validación del método

El método de reconstrucción tomográfica desarrollado se basa en la implementación de una red neuronal con funciones de base radial. La capacidad de adaptación de la red neuronal al problema de ingeniería inversa que se plantea queda determinada por los parámetros de dicha red, como son: el número de neuronas empleado, los pesos de ponderación para las diferentes neuronas y el ancho de los pulsos gaussianos. Existen, también, otros factores externos que presentan una gran influencia en los resultados obtenidos, como son el ruido y el número de puntos de inspección.

La validación del método NNRBF se ha basado en el uso de la teoría de detección en imágenes. El procedimiento seguido consiste en comparar la imagen binaria original, con la imagen reconstruida y también binarizada, estableciendo para ello umbrales de detección distribuidos entre el nivel 0 (correspondiente al negro) y el nivel 1 (correspondiente al blanco). De esta manera, se han obtenido las probabilidades de detección y de falsa alarma para cada una de las muestras inspeccionadas y se han construido las curvas ROC (del inglés, Receiver Operating Characteristic) a partir de dichas probabilidades.

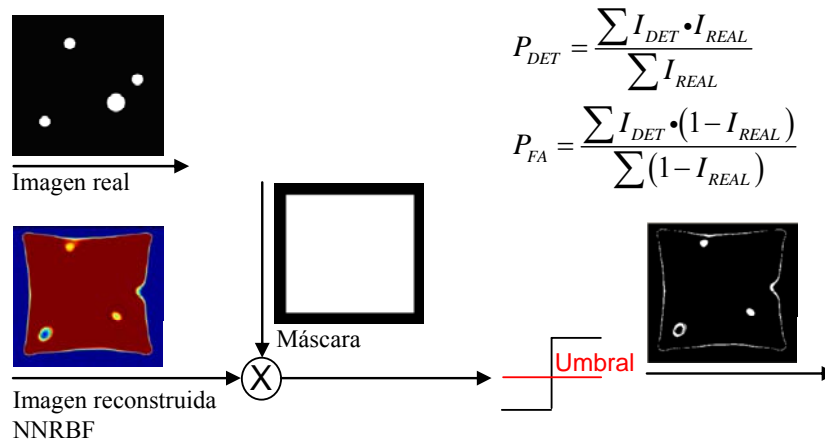


Fig. 40. Diagrama del algoritmo empleado para el cálculo de las curvas ROC

En el diagrama anterior se muestra el procedimiento empleado para la validación del método NNRBF, así como las expresiones matemáticas empleadas en el cálculo de la probabilidad de detección y de falsa alarma para las diferentes imágenes.

A continuación se muestran las curvas ROC obtenidas para una muestra de calibración de duraluminio en la cual se ha definido un único defecto. La imagen reconstruida se ha obtenido aplicando el algoritmo NNRBF y haciendo variar diferentes parámetros de la red neuronal. El

objetivo de este análisis es obtener el valor óptimo de los diferentes parámetros, aumentando, de esta manera, la probabilidad de detección y reduciendo la probabilidad de falsa alarma

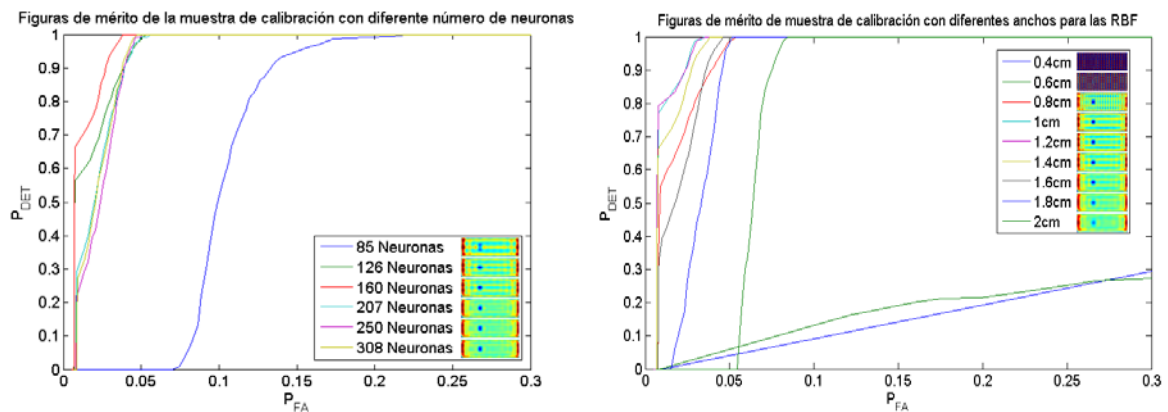


Fig. 41. Curvas ROC para la muestra de calibración variando el número de neuronas (figura izquierda) y el ancho del pulso gaussiano (figura derecha)

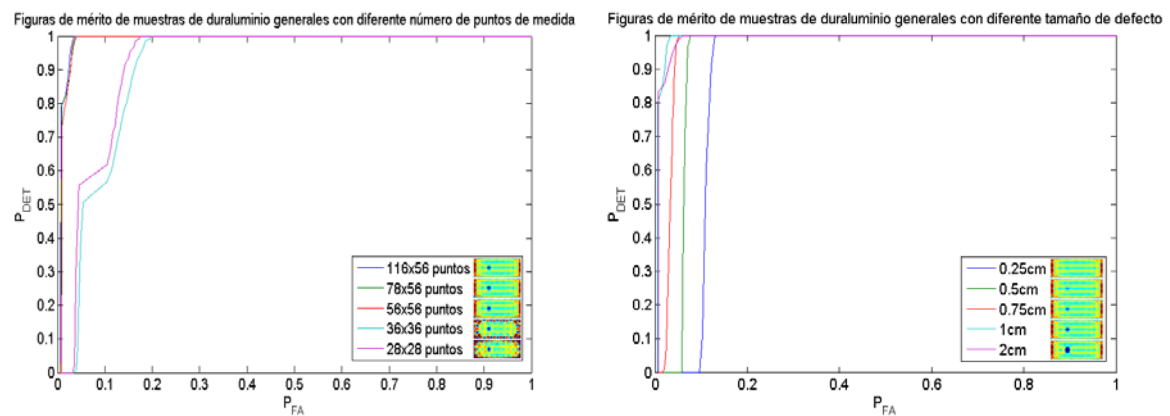


Fig. 42. Curvas ROC para la muestra de calibración variando el número de puntos de medida (izquierda) y el tamaño del defecto (derecha)

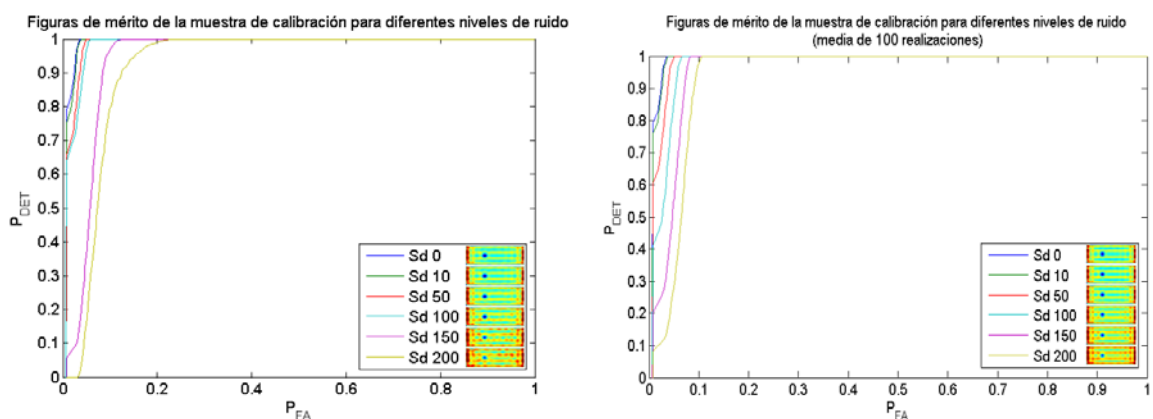


Fig. 43. Curvas ROC para la muestra de calibración variando la desviación estándar del ruido gaussiano

En primer lugar, se ha variado el número de neuronas empleado y el ancho del pulso gaussiano (fig. 41) y se ha observado mediante las curvas ROC que los valores óptimos de las probabilidades de detección y de falsa alarma se alcanzan para 160 neuronas, y 1,2 centímetros de anchura para el

pulso gaussiano. Una vez determinados estos valores se ha procedido a evaluar el algoritmo NNRBF, variando para ello el número de puntos de medida empleados, el tamaño del defecto existente y el nivel de ruido presente en las señales ultrasónicas. (fig. 42 y 43)

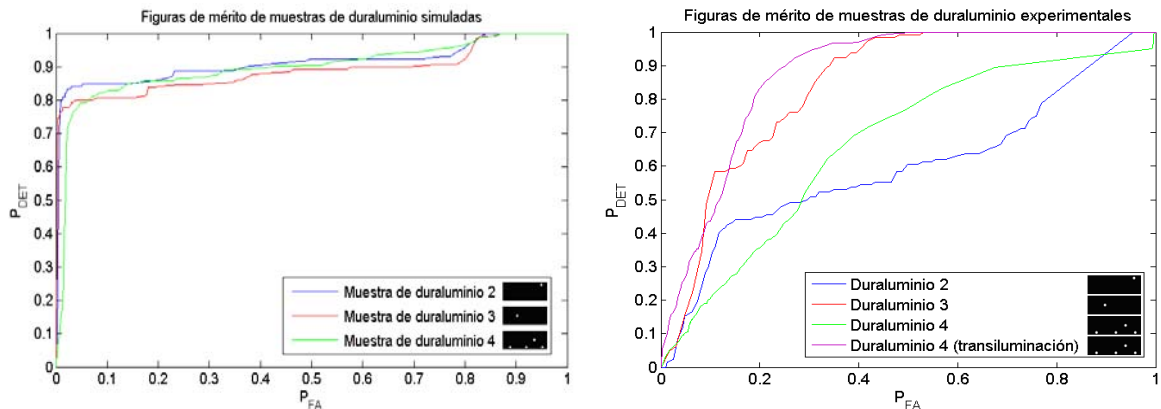


Fig. 44. Curvas ROC obtenidas para las muestras de duraluminio

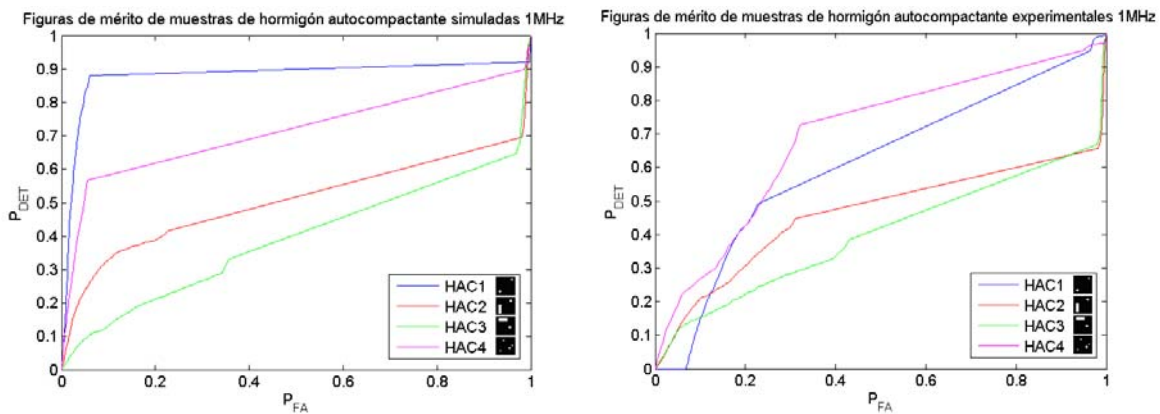


Fig. 45. Curvas ROC obtenidas para las muestras de HAC

Mediante los valores óptimos de la NNRBF obtenidos, se ha procedido a la obtención de las curvas ROC para las muestras de duraluminio y de hormigón autocompactante (fig. 44 y 45).

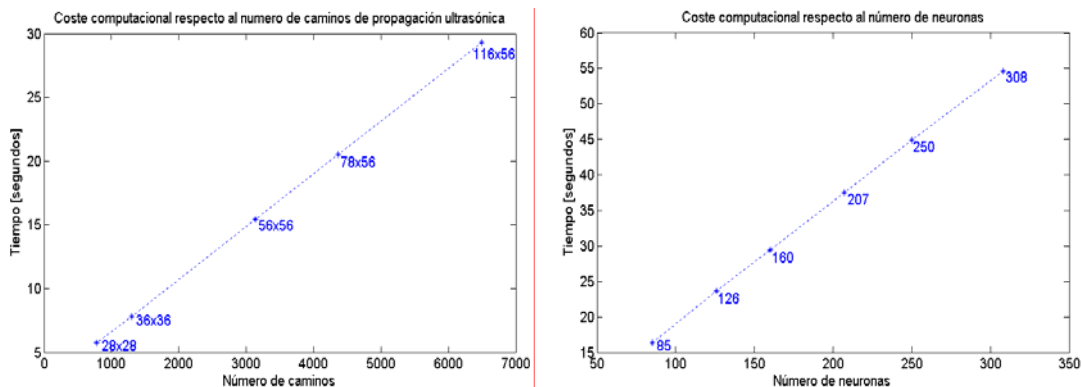


Fig. 46. Coste computacional del algoritmo NNRBF en función del número de neuronas y de caminos

Finalmente, también se ha llevado a cabo el análisis del coste computacional que requiere el método de reconstrucción NNRBF en función del número de puntos de medida y del número de neuronas empleadas por la red.

### VI.5. *Análisis y discusión*

En este punto se realiza un análisis pormenorizado de los resultados obtenidos mediante los algoritmos NNRBF-2D y NNRBF-3D sobre las piezas de duraluminio y hormigón autocompactante con diferentes defectos.

En primer lugar, mediante la simulación previa de las piezas de duraluminio, se ha podido comprobar la necesidad de realizar un mallado de medida adecuado que tenga en cuenta múltiples caminos cruzados. Este mallado facilita la adaptación de las funciones de base radial, y permite determinar la posición y tamaño de los defectos con mayor precisión.

El mallado empleado ha conestado de 116 transductores ultrasónicos en transmisión y 56 transductores en recepción para las muestras simuladas de duraluminio, suponiendo un total de 3276 caminos de propagación. Para las medidas experimentales se han empleado 116 transductores emisores/receptores, siempre enfrentados, por lo que se dispone únicamente de 116 caminos de propagación. El método de transiluminación en la inspección experimental de estas mismas probetas ha requerido 56 transductores de emisión y otros 56 de recepción, suponiendo en este caso 2156 caminos de propagación.

En las probetas de hormigón autocompactante el mallado empleado ha sido el mismo para simulación e inspección experimental, constando de 40 transductores emisores y receptores, para un total de 400 caminos de propagación ultrasónica.

El número de neuronas empleadas en la reconstrucción ha sido de 207 (23 en horizontal x 9 en vertical) para las probetas de duraluminio y de 1225 (35 x 35) para las muestras de hormigón autocompactante, mientras que el ancho de las RBF se ha establecido en 0.018 metros para el duraluminio y 0.13 para el HAC. Todos estos parámetros son los que configuran la red neuronal y se han obtenido por medio de optimización, con el criterio de mantener una probabilidad de detección alta frente a una probabilidad de falsa alarma muy baja. La ponderación de las diferentes neuronas que conforman la red se ha realizado mediante un algoritmo adaptativo basado en el cálculo de la matriz pseudoinversa integral de las RBF que permite obtener los pesos óptimos para cada elemento a reconstruir.

La inspección experimental de las probetas, se ha realizado inicialmente con los transductores transmisor y receptor alineados a lo largo de toda la pieza, lo que no ha permitido identificar claramente la localización y tamaño de los defectos existentes. La aparición de artefactos no reales en las zonas de sombra de dichos defectos se debe a una solución numérica generada por el método NNRBF al no disponer de suficientes caminos cruzados.

Por otra parte cuando se utiliza una segunda metodología de inspección por transiluminación en la cual se produce un desalineamiento entre transductores, el número de caminos de propagación obtenidos crece considerablemente y se obtienen mejores resultados de reconstrucción, tal y como se ha podido observar en las figuras de mérito obtenidas.

Esta metodología de inspección ha sido la empleada finalmente, tanto en las probetas de hormigón como en las de duraluminio. El parámetro que mejor se adapta a esta metodología es la velocidad de propagación en el medio, puesto que esta únicamente varía con la distancia de una forma inversamente proporcional. Los otros parámetros extraídos de las señales ultrasónicas (atenuación y frecuencia centroide), presentan mayores dificultades para llevar a cabo la reconstrucción de defectos, debido a que requieren materiales con una baja dispersión y una gran homogeneidad en su interior.

Por este último motivo, en las piezas de duraluminio, la utilización de la frecuencia centroide y la atenuación del pulso ultrasónico como parámetros de entrada del algoritmo NNRBF, han podido funcionar correctamente en la detección de oquedades. Sin embargo, en un material tan heterogéneo como el hormigón autocompactante, no ha sido posible una buena detección de defectos a partir de estos parámetros, y se ha recurrido únicamente a la velocidad del medio.

Las piezas de duraluminio han podido ser inspeccionadas manualmente mediante transductores de 10 MHz, y, también automáticamente mediante una máquina controlada por ordenador, capaz de efectuar medidas ultrasónicas con acoplamiento por agua con una resolución de 1mm. Los resultados son más precisos cuando empleamos el sistema automático puesto que se tiene una mejor resolución espacial. Sin embargo, en este sistema, los transductores ultrasónicos emisor y receptor se encuentran alineados, lo que impide la detección de múltiples defectos.

Por otra parte, también se ha podido comprobar la dificultad de escalar correctamente el tamaño de los defectos, dado que el pulso ultrasónico sufre un filtrado paso bajo y un ensanchamiento a medida que se propaga a través de un material como el hormigón que presenta múltiples reflectores distribuidos internamente en forma de pequeños áridos.

En conclusión, las probetas de hormigón resultan más difíciles de reconstruir debido a los motivos comentados anteriormente. Asimismo, se ha podido comprobar que la simulación de la propagación de ondas ultrasónicas a través del hormigón resulta muy difícil dada su compleja composición interna. Es por este motivo, por el que se obtienen unos mejores resultados en las probetas de HAC simuladas, puesto que el modelo de hormigón empleado es un modelo muy simplificado. La implementación de un modelo más complejo es objeto de continuo estudio en la actualidad, dando lugar a multitud de proyectos de investigación por si mismo, por lo que escapa del alcance de este trabajo [35], [36] y [37].

## **VII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

El desarrollo de un algoritmo de interpolación no lineal, consistente en una red neuronal de funciones de base radial, ha permitido la obtención de imágenes reconstruidas del interior de determinados materiales, en nuestro caso duraluminio y hormigón autocompactante, si bien el método puede ser aplicable a cualquier material del que queramos conocer su composición interna.

Los resultados obtenidos mediante el algoritmo NNRBF han demostrado una elevada probabilidad de detección (alrededor del 90%), y una baja probabilidad de falsa alarma (entre el 10% y el 15%) en la detección de defectos internos en los materiales analizados. Sin embargo, algunos errores se han producido debido al procesado numérico en los bordes de la pieza inspeccionada, así como en algunas zonas de sombra producidas por la existencia de defectos.

La limitación más clara que se ha podido encontrar tras los trabajos realizados, ha sido la dificultad del método a la hora de dimensionar correctamente los defectos, fundamentalmente en las piezas de HAC. A medida que el pulso ultrasónico se propaga por la pieza, este se va ensanchando y por tanto los defectos más alejados de los transductores se magnifican. Este efecto no ocurre en zonas próximas a los transductores, debido a que en esas regiones el haz ultrasónico se mantiene estrecho.

Una posible solución a este problema es la utilización de un “phased array” compuesto de diferentes transductores ultrasónicos. Variando la amplitud y la fase del pulso ultrasónico es posible generar un haz más estrecho y directivo que apunte en cada momento a la región que se desea inspeccionar.

Mediante la primera campaña de medidas experimentales en las probetas de duraluminio se ha podido comprobar que, para la detección de varios defectos es necesario introducir un desalineamiento entre el transductor emisor y receptor, ya que, en el caso contrario no se dispone de suficiente información cruzada del interior del material. Al emplear este método de desalineamiento, conocido con el nombre de transiluminación, el parámetro ultrasónico utilizado es el de la velocidad de onda longitudinal, ya que depende con la distancia en una relación de primer orden, mientras que la atenuación o la frecuencia lo hacen en un orden superior.

La realización de un modelo de propagación ultrasónico en diferentes materiales mediante la técnica de las diferencias finitas, ha permitido la calibración y validación inicial de los algoritmos NNRBF implementados. Además, gracias a esta modelización previa se ha podido reducir los puntos de inspección ultrasónica en las probetas, disminuyendo los tiempos de medida y de procesado posterior. Para ello se han realizado múltiples simulaciones, empleando diferente número de puntos de medida e introduciendo en algunos casos diferentes fuentes de ruido, como las que se pueden encontrar en la inspección ultrasónica de campo y de laboratorio. Se ha podido comprobar la capacidad de adaptación de los algoritmos frente al ruido.

La capacidad de las redes de funciones de base radial para resolver el problema de ingeniería inversa planteado ha quedado demostrada, tanto en las simulaciones como en las medidas experimentales. Por tratarse de un método de interpolación no lineal, su eficacia y su robustez se han podido comprobar frente a otros algoritmos previos tales como la tomografía axial computerizada, o la tomografía por reflexión, y con una reducción de los recursos computacionales frente a métodos de reconstrucción como el SAFT de en torno al 10%.

De las conclusiones obtenidas de este trabajo de investigación, se pueden extraer algunas ideas para líneas de investigación futuras. Se plantean ciertas mejoras a introducir en el algoritmo NNRBF de reconstrucción y, también, mejoras en los sistemas de inspección ultrasónica.

En cuanto a los sistemas de inspección, una de las conclusiones más claras del trabajo de investigación llevado a cabo, es la necesidad de disponer de un amplio número de caminos de propagación acústica, y que estos además sigan trayectorias cruzadas entre sí. Para el análisis de piezas en laboratorio, se deberá adecuar un tomógrafo automático capaz de inspeccionar la muestra para varios ángulos de incidencia.

En el caso de las medidas de campo, se plantea el desarrollo de un sistema inalámbrico de inspección sónica o ultrasónica, que este basado en el protocolo ZIGBEE de comunicación, de tal forma que permita la adquisición de señales de alta frecuencia sin necesidad de cables, lo que facilitará en gran medida el trabajo de inspección en entornos difíciles.

En cuanto a los algoritmos NNRBF propiamente dichos, se debe profundizar en el desarrollo de los algoritmos de optimización que permiten entrenar los parámetros de la red, adaptándose al entorno de análisis, a la naturaleza de los defectos y a las características del material inspeccionado. Se pueden emplear algoritmos de optimización clásicos (estimaciones cuadráticas sucesivas, Newton-Raphson, quasi-Newton, etc), algoritmos genéticos, o incluso mixtos. Estos algoritmos adaptativos permitirán obtener los parámetros de la NNRBF que permitan obtener imágenes tomográficas más precisas con un menor coste computacional.

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo de investigación se ha podido llevar a cabo gracias a la financiación del IMPIVA a través de su programa de Investigación y Desarrollo para Institutos Tecnológicos. Este programa se financia a través de los fondos FEDER de la Unión Europea y la Generalitat Valenciana.

En concreto el proyecto al cual se adscribe este trabajo de investigación es el denominado “INSPECHORM: Técnicas de auscultación avanzada para el diagnóstico del hormigón” (IMIDIC/2010/224).

La línea 4 del proyecto INSPECHORM3 se está llevando a cabo en colaboración con el Grupo de Tratamiento de Señal del Departamento de Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, mediante un convenio de colaboración MARCO firmado entre ambas entidades.

Finalmente, cabe destacar la reciente concesión de un proyecto del Plan Nacional de I+D+i del Ministerio de Ciencia e Innovación, en la línea del curado de hormigón. Este proyecto recoge tareas de reconstrucción tomográfica del hormigón en diferentes fases de su curado, empleando para ello un sistema automático de medida. El proyecto en cuestión recibe el nombre de “ECE-NANO: Establecimiento de relaciones microestructura-propiedades en materiales cementicios con propiedades mejoradas mediante la adición de nanopartículas de TIO<sub>2</sub> y SIO<sub>2</sub>” (BIA2010-16510).



## **BIBLIOGRAFÍA**

### Tomografía Ultrasonica

1. Stanley JH. Computed Tomography: An Overview of an Advanced Inspection Modality. Proceedings of the Thirty-First International Instrumentation Symposium. San Diego, CA: Instrument Society of America; 1985. p. 727-38.
2. Tsao MC. Industrial Ultrasonic Tomography - Principle, Practice and Limitation. Materials Evaluation. Columbus, OH: The American Society for Nondestructive; 1983. p. 1248-54.
3. Cormack AM. Representation of a Function by its Line Integrals, with some Radiological Applications (Part I) Journal of Applied Physics. New York, NY: American Institute of Physics; 1963. p. 2722-27.
4. Cormack AM. Representation of a Function by its Line Integrals, with some Radiological Applications (Part II). Journal of Applied Physics. New York, NY: American Institute of Physics; 1964. p. 2908-13.
5. Zanzi L, Lualdi M, A.Sainsi. Sonic and Radar Tomography on Masonry Structures. RILEM TC 177-MDT Workshop on On-Site Control and Non-Destructive Evaluation of Masonry Structures. Mantova (ITALY); 2001.
6. Orlando L, Pezone A, Colucci A. Modeling and Testing of High Frequency GPR data for Evaluation of Structural Deformation. NDT & E International; 2010. p. 216-30.
7. Green PS, Ostrem JS, Whitehurst TK. Combined reflection and transmission ultrasound imaging. Ultrasound Med. Biol.; 1991. p. 283-89.
8. Liang HD, Halliwell M, Wells PNT. Continuous Wave Ultrasonic Tomography. Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. New York, NY: IEEE; 2001. p. 258-92.
9. Mensa DL, Halevy S, Wade G. Coherent Doppler Tomography for Microwave Imaging. Proceedings IEEE; 1983. p. 241-61.
10. Wade G, Elliott S, Khogeer I, Flesher G, Eisler J, Mensa D, et al. Acoustic Echo Computer Tomography. In: Metherell AF, editor. Acoustic Imaging. London; 1978. p. 567-76.
11. Frederick JR, Seydel JA, Fairchild RC. Improved Ultrasonic Nondestructive Testing of Pressure Vessels. Yearly Progress Report. Washington, DC: Nuclear Regulatory Commission; 1975.
12. Seydel JA. Ultrasonic Synthetic Aperture Focusing. Research Techniques in Nondestructive Testing. New York, NY; 1982. p. 1-47.
13. Hildebrand BP, Harrington TP. Mapping of Materials Stress with Ultrasonic Tomography. Materials Evaluation. Columbus, OH: The American Society for Nondestructive Testing; 1981. p. 382-90.

Aplicaciones de la Tomografía Ultrasónica

14. Hildebrand BP. Tomographic Reconstruction of Residual Stress Concentrations. Proceedings of the Thirteenth Symposium on NDT; 1981. p. 383-402.
15. Vergara L, Gosálbez J, Fuente JV, Miralles R, Bosch I, López AM, et al. Ultrasonic Nondestructive Testing on Marble Rock Blocks. Materials Evaluation; 2004. p. 73-78.
16. Krause M, Schickert G, Wiggenhauser H. Ultrasonic Inspection of Tendon Ducts in Concrete Slabs using 3D-SAFT. Acoustical Imaging; 1996. p. 433-39.
17. Schickert M, Krause M, Müller W. Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique. Journal of Materials in Civil Engineering (JMCE); 2003.
18. Brown GJ, Reilly D, Mills D. Development of an Ultrasonic Tomography System for Application in Pneumatic Conveying. Measurement Science and Technology. Glasgow; 1996. p. 396.
19. Brancheriau L, Lasaygues P, Debieu E, Lefebvre JP. Ultrasonic Tomography of Green Wood using a Nonparametric Imaging Algorithm with Reflected Waves. Annals of Forest Science; 2008. p. 712.
20. Mensah S, Lasaygues P. Ultrasound Tomography : Application to Breast and Bone Imaging. Journal of Automation and Systems Engineering; 2009.

Aplicaciones de las redes neuronales con RBF

21. Broomhead DS, Lowe D. Multivariable Functional Interpolation and Adaptive Networks. Complex Systems; 1988. p. 321-55.
22. Moody J, Darken C. Learning with Localized Receptive Fields. In: University CM, editor. Connectionist Models Summer School; 1988.
23. Kaminsky EJ, Deshpande N. TCM Decoding using Neural Networks. Engineering Applications of Artificial Intelligence; 2003. p. 473-89.
24. Yingwei L, Sundararajan N, Saratchandran P. Adaptive Nonlinear System Identification using Minimal Radial Basis Function Neural Networks. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'96); 1996. p. 3521-24.
25. Leong EJ, Saratchandran P, Sundararajan N. Real-time Performance Evaluation of the Minimal Radial Basis Function Network for Identification of Time Varying Nonlinear Systems. Computers and Electrical Engineering; 2002. p. 103-17.
26. Zhou P, Austin J. Neural Network Approach to Improving Fault Location in Local Telephone Networks. Proceedings Artificial Neural Networks; 1999. p. 958-63.
27. Palicot J, Roland C. A New Concept for Wireless Reconfigurable Devices. IEEE Communication Magazine; 2003. p. 124-32.

28. Wiens T. Sensing of Turbulent Flows Using Real-Time Acoustic Tomography. Nineteenth Biennial Conference of the New Zealand Acoustical Society; 2008.

29. Zhang L, Wang H, Ma M, Jin X. Image Reconstruction Algorithm for Electrical Capacitance Tomography based on Radial Basis Function Neural Network. Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou; 2005.

#### Modelo de Propagación Ultrasónica

30. Beranek L. Acoustics. In: Physics AIo, editor; 1986.

31. Vergara L, Fuente JV, Gosálbez J, Miralles R, Bosch I. Processing of ultrasonic grain noise signals for the estimation of depth -and frequency- dependent attenuation. Measurement Science and Technology; 2003. p. 1018-24.

32. Vergara L, Gosálbez J, Miralles R, Bosch I. On estimating the center frequency of ultrasound pulses. Ultrasonics; 2004. p. 813-18.

33. Vergara L, Gosálbez J, Fuente JV, Miralles R, Bosch I. Measurement of cement porosity by centroid frequency profiles of ultrasonic granular noise. Signal Processing; 2004. p. 2315-24.

#### Métodos de Propagación Ultrasónica

34. Schechter R, Chaskelis H, Mignogna R, Delsanto P. Real-Time Parallel Computation and Visualization of Ultrasonics Pulses in Solids. Science; 1994. p. 1188-92.

#### Modelización Multifásica del Hormigón

35. Mihashi H, Maekawa K, Ishida T, Asamoto S, Maruyama I. Multi-scale modeling to link observed behaviour, characterization and analysis. 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures. Ise-Shima (JAPAN); 2008.

36. Breugel Kv. Numerical simulation of hydration and microstructural development in hardening cement-based materials. Theory and applications. Cement and Concrete Research; 1995. p. 319-31.

37. Bernard O, Ulm FJ, Lemarchand E. A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials Cement and Concrete Research; 2003. p. 1293-309.

## ANEXO 1. EQUIPAMIENTO EMPLEADO



Fig. 47. Palpador V101 de PANAMETRICS

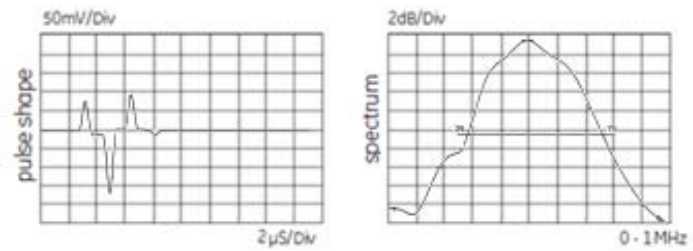


Fig. 48. Palpador K1SC de KRAUTKRAMER

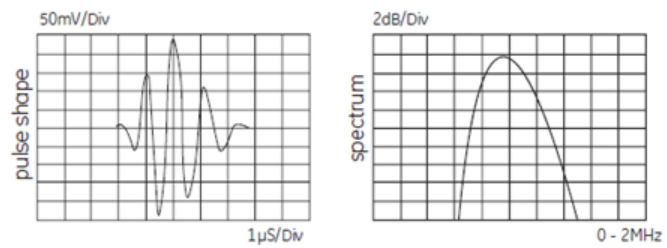


Fig. 49. Palpador K10K de KRAUTKRAMER

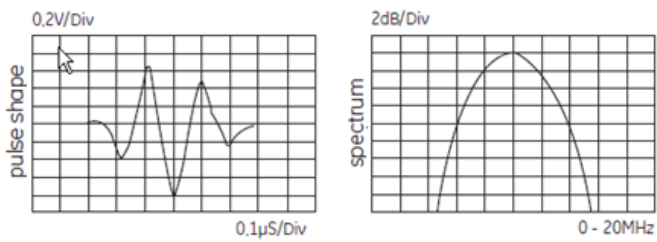


Fig. 50. Pulsar/receiver ultrasónico DPR300 de JSRULTRASONICS

## **ANEXO 2. PUBLICACIONES**

*AUTORES: V. Albert, J. Gosálbez, A. Salazar, R.Fernández, J.V.Fuente*

*TÍTULO: Ultrasonic tomography reconstruction based on neural networks with radial basis functions*

*REVISTA: Measurement and Science Technology*

*ESTADO: Submitted*

---

*AUTORES: V. Albert, A. Salazar, J. Gosálbez, R.Fernández, J.V.Fuente*

*TÍTULO: Non-destructive ultrasonic evaluation with neural networks of concrete based materials*

*REVISTA: Materials evaluation*

*ESTADO: Submitted*

---

*AUTORES: V. Albert, J. Gosálbez, A. Salazar, R.Fernández, J.V.Fuente*

*TÍTULO: Reconstrucción tomográfica de materiales con redes de funciones de base radial construidas a partir de inspección ultrasónica*

*TIPO DE PRESENTACIÓN: Ponencia Y Artículo*

*CONGRESO: XII Congreso Español de Ensayos No Destructivos*

*LUGAR: Valencia (España)*

*FECHA: Junio 2011*

---

*AUTORES: J.V. Fuente, V. Albert, R.Fernández, R.Martínez, S. Martínez, N. González, J. V. Sabater y J. Yuste.*

*TÍTULO: Integration of the technologies applied to the structural assessment. Case of study: concrete water-tank deposit*

*TIPO DE PRESENTACIÓN: Ponencia Y Artículo*

*CONGRESO: I Workshop MEMSCON Structural monitoring and status dependent maintenance and repair of constructed facilities*

*LUGAR: Bucharest (Romania)*

*FECHA: Octubre 2010*

---

*AUTORES: J.V. Fuente, R.Fernández y V.Albert.*

*TÍTULO: Brick masonry elastic modulus determination using the numerical simulation and experiments of sonic wave propagation*

*TIPO DE PRESENTACIÓN: Ponencia on-line y Artículo*

*CONGRESO: Online Workshop: Simulation in NDT 2010*

*FECHA: Septiembre 2010*

---

*AUTORES: J. V. Fuente, T. Ibrahim, R. Fernández, V.Albert, V.Ciscar*

*TÍTULO: Integration of non-destructive techniques for the assessment of a concrete structure by means of dynamic analysis: Application to a water tank*

*TIPO DE PRESENTACIÓN: Artículo*

*PUBLICACIÓN: Boletín especial de la AEND para la X European Conference on Non Destructive Testing.*

*EDITOR: Asociación Española de Ensayos No Destructivos (AEND)*

*LUGAR: Madrid (Spain)*

*VOLUMEN: 51*

*PÁGINAS: 9-22*

*FECHA: Junio 2010*

---

AUTORES: J. V. Fuente, T. Ibrahim, R. Fernández, *V.Albert*, V.Ciscar  
TÍTULO: *Prediction of the Mortar Properties along the Life-cycle using Ultrasonic Evaluation*  
TIPO DE PRESENTACIÓN: Ponencia Y Artículo  
CONGRESO: XXXVII IAHS World Congress on Housing  
LUGAR : Santander (Spain)  
PROCEEDINGS: ISBN 978-84-693-6655-4  
FECHA: Octubre 2010

---

AUTORES: J. Gosalbez, JV Fuente, G. Safont, R. Fernández, A. Salazar y *V.Albert*.  
TÍTULO: *Experimentación en Laboratorio de reproducciones a escala de muros históricos mediante Monitorización END y QEND.*  
TIPO DE PRESENTACIÓN: Ponencia Y Artículo  
CONGRESO: III Jornadas Técnicas Internacional sobre Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio Construido (Rehabend 2009)  
LUGAR : Bilbao (España)  
PROCEEDINGS: ISBN 978-84-8873-404-4  
FECHA: Octubre 2009

---

AUTORES: J.V. Fuente, J. Gosálbez, R. Fernández, G. Safont, *V. Albert*, A. Salazar y N. González  
TÍTULO: *Caracterización del estado tensional de sistemas constructivos complejos como muros históricos mediante ensayos no destructivos y quasi-no destructivos*  
TIPO DE PRESENTACIÓN: Artículo  
PUBLICACIÓN: Boletín de la AEND  
EDITOR: Asociación Española de Ensayos No Destructivos (AEND)  
LUGAR: Madrid (Spain)  
VOLUMEN: 52, 53  
PÁGINAS: 8-16  
FECHA: Septiembre 2010

---