

UNIVERSIDAD CARLOS III

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA
DE MATERIALES E INGENIERÍA QUÍMICA



GRADO DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**PUESTA A PUNTO DE UN EQUIPO DE DETECCIÓN
DE DEFECTOS POR ULTRASONIDOS**

Autor: Javier Rafael González

Tutor: Miguel Ángel Martínez Casanova

Enero 2016, Madrid.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer la consecución, de este trabajo en particular y de la carrera en general, a todas esas personas que me han ayudado en este duro y largo viaje.

Por un lado a todos los profesores que gracias a ellos he adquirido los conocimientos necesarios para la realización de este trabajo, es especial a los integrantes del Departamento de Materiales.

Por otro lado, agradezco la gran ayuda que he recibido de mi tutor, Miguel Ángel, que siempre ha estado atento y dispuesto a orientarme cuando lo necesitaba a pesar de que no siempre haya sido fácil.

No me puedo olvidar tampoco de los numerosos compañeros con los que he compartido estos años de universidad y junto con los que he luchado para llegar hasta aquí, en especial junto a Borja. De ellos me llevo un grandísimo recuerdo.

Por último, y más importante, quiero agradecer el apoyo recibido, tanto en los buenos momentos como en los malos, por parte de mi familia y mi novia, sin los cuáles veo imposible haber llegado donde he llegado.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos.....	2
Índice de figuras.....	5
1. Resumen y objetivo del proyecto.....	7
2. Abstract.....	7
3. Fundamentos teóricos de los ultrasonidos.....	8
3.1. Introducción a los ultrasonidos.....	8
3.2. Propiedades técnicas de los ultrasonidos.....	9
3.2.1. Propagación de las ondas ultrasónicas.....	10
3.2.2. Parámetros de los ultrasonidos.....	10
3.3. Tipos de ondas ultrasónicas.....	12
3.3.1. Ondas longitudinales.....	13
3.3.2. Ondas transversales.....	13
3.3.3. Ondas de Lamb.....	14
3.3.4. Ondas de Rayleigh.....	15
3.3.5. Ondas de torsión.....	15
3.4. Descomposición de las ondas.....	15
3.4.1. Reflexión.....	16
3.4.2. Refracción.....	16
3.4.3. Difracción.....	17
3.4.4. Interferencia.....	18
3.4.5. Absorción.....	18
3.5. Ensayos No Destructivos (Transductores).....	19
3.5.1. Efecto Piezoeléctrico.....	20
3.5.2. Efecto Magnetoestrictivo.....	20
3.6. Tipos de ensayos.....	21
3.6.1. Método contacto directo.....	21
3.6.1.1. Método Pulso-eco.....	23
3.6.1.2. Método de transmisión.....	23
3.6.2. Método de inmersión.....	24
3.6.2.1. Inmersión en tanque.....	24
3.6.2.2. Sistema de chorro de agua.....	25
3.6.2.3. Sistema de rueda.....	25
3.7. Representación de los resultados de los ensayos.....	25
3.7.1. Representación A-Scan.....	25
3.7.2. Representación B-Scan.....	26
3.7.3. Representación C-Scan.....	27
4. Parte experimental y descripción del equipo.....	27
4.1. Descripción del equipo.....	28
4.2. Componentes.....	29

4.2.1.	Unidad de control.....	29
4.2.2.	Sondas/Palpadores.....	31
4.2.3.	Bloques de prueba.....	32
4.3.	Software.....	35
4.3.1.	Programa.....	35
4.3.2.	Pantalla principal.....	36
4.3.3.	Menú de opciones.....	38
4.3.3.1.	Parameter (Parámetros).....	38
4.3.4.	Transferencia de datos.....	39
4.3.5.	Análisis de frecuencia.....	40
4.3.6.	Métodos de imagen.....	41
4.3.6.1.	Time Motion Mode (Modo TM).....	41
4.3.6.2.	Brightness Mode (Modo B).....	42
4.3.6.3.	Computer Tomography CT (Tomografía).....	43
4.4.	Experimentos propuestos.....	44
4.4.1.	PHY06 Dependencia de frecuencia de poder de resolución.....	45
4.4.2.	IND01 Prueba No Destructivos (END).....	46
4.4.3.	IND03 Medición de nivel.....	50
4.4.4.	IND06 Pruebas de haz de ángulo.....	51
4.4.5.	IND07 Determinación de la profundidad de grieta (TOFD).....	55
4.4.6.	PYH04 Atenuación acústica en líquidos.....	58
4.4.7.	IND08 Detección de discontinuidades.....	60
5.	Guión de la práctica.....	62
6.	Conclusiones.....	76
7.	Lineas futuras de investigación.....	76
8.	Bibliografía.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Equipo de ultrasonidos industrial del año 1945	9
Figura 2	Floyd Firestone con equipo de ultrasonidos.	9
Figura 3	Diagrama de una onda	10
Figura 4	Mecánica de una onda longitudinal	13
Figura 5	Mecánica de una onda transversal	14
Figura 6	Mecánica de una onda de Lamb	14
Figura 7	Mecánica de una onda de Rayleigh	15
Figura 8	Reflexión de una onda	16
Figura 9	Refracción de una onda	17
Figura 10	Difracción de una onda	17
Figura 11	Interferencia de dos ondas	18
Figura 12	Absorción de una onda	19
Figura 13	Partes de una sonda ultrasónica	20
Figura 14	Diferencias entre contacto directo e inmersión	21
Figura 15	Transductor curvo.	22
Figura 16	Mecánica método Pulso-Eco.	23
Figura 17	Tanque de inmersión.	24
Figura 18	Diagrama obtenido a través del Gampt-Scan.	26
Figura 19	Mecánica de la representación A-Scan.	26
Figura 20	Kit de ultrasonidos Gampt-Scan.	28
Figura 21	Panel de mandos de la unidad de control.	30
Figura 22	Tipos de palpadores utilizados en la unidad de control.	31
Figura 23	Bloque Transparente de metacrilato	32
Figura 24	Cuñas de haz angular.	33
Figura 25	Bloque de pruebas de aluminio con grietas.	34
Figura 26	Bloque de pruebas de aluminio con diferentes defectos.	34
Figura 27	Doble cuña de haz de ángulo.	35
Figura 28	Pantalla principal de Gampt-Scan.	36
Figura 29	Diagrama TGC	37
Figura 30	Barra de desplazamientos en el diagrama.	37
Figura 31	Selector de velocidad del sonido.	38
Figura 32	Interfaz de parámetros	38
Figura 33	Opciones de transferencia de datos.	39
Figura 34	Análisis de frecuencia	40
Figura 35	Modo de imagen Time Motion	41
Figura 36	Modo B de imagen	42
Figura 37	Distribución CT Scanner.	43
Figura 38	Componentes del experimento PHY06.	45
Figura 39	Componentes del experimento IND01	47
Figura 40	Imagen del ensayo IND01.	48

Figura 41 Distribución de defectos en el bloque de pruebas.....	49
Figura 42 Componentes del experimento IND03.....	50
Figura 43 Componentes del experimento IND06.....	52
Figura 44 Bloque de calibración IIW	53
Figura 45 Parámetros del bloque IND06.....	53
Figura 46 Diagrama del experimento IND06.....	55
Figura 47 Componentes del experimento IND07.....	56
Figura 48 Medidas del bloque IND07.....	57
Figura 49 Diagrama del experimento IND07.....	58
Figura 50 Componentes del experimento PHY04	59
Figura 51 Componentes del experimento IND08.....	60
Figura 52 Diagrama posición 1 defecto oblicuo.....	62
Figura 53 Diagrama posición 2 defecto oblicuo.....	62

1. RESUMEN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

Este proyecto consiste en realizar la puesta en marcha de un sistema de ultrasonidos para la detección de defectos en materiales y va a ser empleado para desarrollar una parte de una práctica en el laboratorio de alumnos de la asignatura de Tecnología de Materiales del Grado de Tecnologías Industriales. Este sistema se ha adquirido nuevo y la misión es la de realizar un manual de uso para su futuro empleo tanto de los alumnos como del personal de la universidad. Para la realización de dicho manual se realizan multitud de experimentos, los cuales son explicados para su futura reproducción.

Los experimentos son un total de siete, pero debido a falta de material que fue mandado por el distribuidor solo se pueden realizar cuatro de ellos y que en un futuro serán completados para poder dar por concluido dicho manual.

El manual consta de tres partes, en la primera de ellas se realiza una descripción de los ultrasonidos, incluyendo los tipos, las características y demás elementos de los mismos, en la segunda se procede a dar una explicación general de la utilización del equipo con el que se realizan los ensayos y en la tercera finalmente se explica y desarrolla cada uno de los experimentos prácticos.

Finalmente, de este manual se extrae un guion para su uso como parte de la práctica de END propuesta para los alumnos de la asignatura de Tecnología de Materiales. Esta práctica se implantará por primera vez en el segundo cuatrimestre del curso 2015-2016.

Aparte de la puesta en marcha del equipo se intenta profundizar en la investigación de la inspección de materiales a través de los ultrasonidos.

2. ABSTRACT

This project consists of an ultrasound system installation and start-up for detection of defects in materials. It will be employed to carry out laboratory practical work as part of the course "Materials Technology", Industrial Technologies Degree. The purpose is to develop and design a User's Manual for this brand-new piece of equipment that can be used in the future by students and research staff. Therefore, a multitude of experiments were done and will be used as models for future reproductions.

Initially, seven different experiments were planned, but due to a lack of material provided by the distributor the number of experiments was reduced to four, and the rest will be completed in the future to finalize the manual.

The manual has three chapters. In the first one, a description of ultrasounds, types and characteristics can be found, while the second chapter consists of a general description on

how to use the equipment. Finally, in the third chapter, a detailed description of each of the practical experiments is elaborated.

Besides the installation and start-up of the equipment, further research will be done on the topic of material inspection by means of ultrasounds.

Ultimately, a lab-work guide is derived from this manual for its further use in the proposed laboratory practices as part of Materials Technology course. This laboratory practice will be implemented for the first time in 2015-2016 year

3.FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS ULTRASONIDOS

3.1. INTRODUCCION A LOS ULTRASONIDOS:

Los ultrasonidos son ondas acústicas de idéntica naturaleza que las ondas sónicas, diferenciándose de estas en que su campo de frecuencias se encuentra por encima de la zona audible. Por los fenómenos que provocan en la propagación en los sólidos, líquidos y gases, han dado lugar a numerosas aplicaciones técnicas y científicas, entre ellas el control de calidad de diversos materiales para la detección de discontinuidades en los mismos.

A lo largo del tiempo, el hombre ha intentado conocer la calidad de los materiales a través del sonido, a través de golpes en estos mediante algún utensilio y escuchando el eco para intentar detectar algún tipo de anomalía.

En 1928, el científico ruso Sergei Sokolov inició la ciencia de los ultrasonidos para la detección de defectos en materiales metálicos, por eso se le conoce como el padre de los ensayos ultrasónicos. Desarrolló sus estudios en los años 20 y a pesar de las dificultades por la limitación de la tecnología de la época, consiguió demostrar que las ondas ultrasónicas se podían usar como una especie de microscopio basándose en las leyes de la reflexión, aunque hasta los años 30 no aparecieron los equipos necesarios para llevar a cabo estas técnicas, que ayudaron a la aparición de los primeros equipos de radar y navegación submarina (Figura 1).

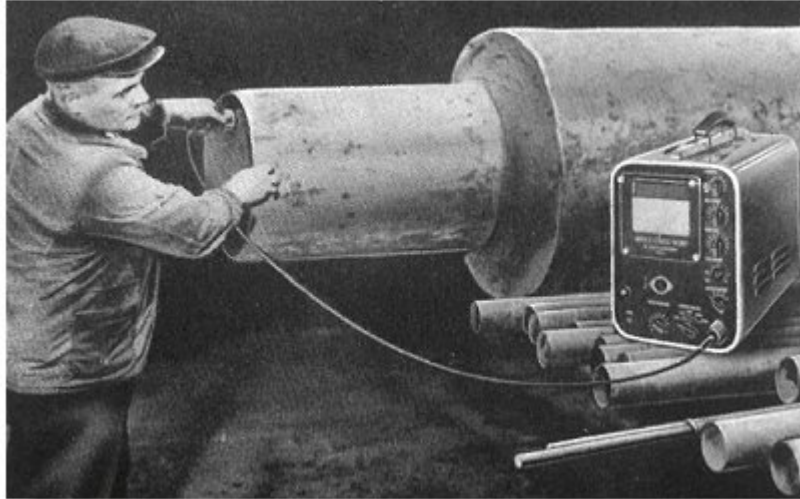


Figura 1 Equipo de ultrasonidos industrial del año 1945

Más tarde, en 1931, Mulhauser desarrolló la patente para la detección de defectos en materiales sólidos a través de los ultrasonidos, utilizando para ello dos sondas.

En 1942, Firestone (Figura 2) fue el pionero en introducir los fundamentos del sonar tanto para usos marinos, ya fuera la detección de navíos o para medir la profundidad del mar, como para el sondeo de materiales en busca de discontinuidades. Ya en 1945, los ultrasonidos se convirtieron en una ciencia muy extendida debido a la demanda de ensayos no destructivos. [1]



Figura 2 Floyd Firestone con equipo de ultrasonidos.

3.2. PROPIEDADES TÉCNICAS DE LOS ULTRASONIDOS

3.2.1. Propagación de las ondas ultrasónicas:

Las ondas ultrasónicas son vibraciones mecánicas a través de un medio sólido, líquido o gaseoso, con una determinada velocidad y dirección. La naturaleza de este tipo de ondas se debe a sus altas frecuencias y longitudes de ondas cortas, por lo que son las más apropiadas para inspeccionar el interior de materiales ya que estas siguen una trayectoria continua. [2]

Por otro lado, en los medios líquidos y gaseosos solamente permitirían una propagación de ondas longitudinales debido a que no ofrecen ninguna resistencia a su paso. Es por esto que en los medios sólidos se propagan las ondas de todos los tipos, que se tratarán más adelante. [3]

3.2.2. Parámetros de los ultrasonidos.

Las ondas de ultrasonidos viajan de forma muy parecida a la luz, con la diferencia de que los ultrasonidos necesitan de un medio para poder propagarse, el cuál debe ser elástico, como puede ser un líquido o un sólido. En la Figura 3 se pueden observar los parámetros básicos de una onda, en este caso sonora y que son la longitud de onda (λ), la amplitud (A) y el periodo (T): [4]

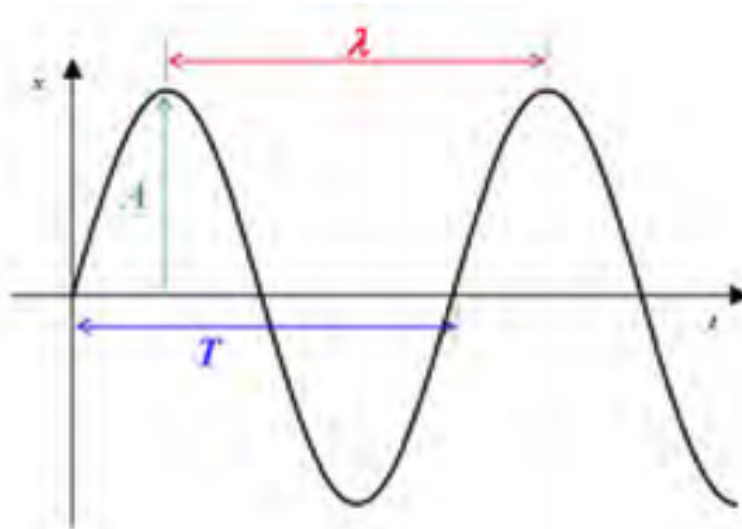


Figura 3 Diagrama de una onda

- Periodo (T): Tiempo que tarda una onda en realizar una oscilación completa.

- Longitud de onda (λ): es la distancia que hay entre dos planos con el mismo estado de movimiento de las partículas. Se mide en metros y es inversamente proporcional a la frecuencia. C es la velocidad del sonido en el medio que atraviesa la onda.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

- Amplitud máxima de oscilación (A): Es el máximo desplazamiento que realiza una partícula desde la posición cero o de equilibrio.
- Frecuencia de la onda (f): es el número de oscilaciones que realiza una partícula por segundo y es la misma en todas las partículas dentro de una onda e igual a la frecuencia de trabajo del generador de ultrasonidos. También se corresponde con la inversa del periodo.

$$f = \frac{1}{T}$$

- Velocidad acústica c : Corresponde a la velocidad de propagación del sonido cuando atraviesa un material o la distancia por unidad de tiempo recorrida. Es característica y constante para cada medio y está relacionada con la frecuencia y la longitud de onda.

Dentro de velocidad acústica se distinguen velocidad acústica longitudinal y transversal y se definen mediante las expresiones que presentamos a continuación, donde E es el módulo de elasticidad que se mide en N/m^2 , μ el coeficiente de Poisson, que es adimensional y ρ la densidad del material que se mide en kg/m^3 .

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \mu)}}$$

Estas dos velocidades están relacionadas entre sí como puede observarse a continuación:

$$c_l = c_t \cdot \sqrt{\frac{2(1 - \mu)}{1 - 2\mu}}$$

- Velocidad instantánea de vibración (v): en el momento oscilatorio, la partícula lleva una velocidad determinada y se corresponde con la velocidad instantánea de vibración.
- Impedancia acústica (Z): es la resistencia que opone un determinado medio a que este se deforme debido a la vibración de la onda. Por otro lado, no se opone a la propagación de

dicha onda y se calcula como el producto entre la velocidad de propagación del medio y la densidad de este.

$$Z = \frac{P}{V} = \rho c$$

- Presión acústica (P): la presión depende de la densidad de partículas del medio en cuestión, a mayor densidad, mayor será a su vez la presión acústica. Si se colocase un medidor de presiones microscópico en el campo creado por la onda se obtendrían presiones altas y bajas de forma alterna siguiendo una secuencia periódica. Esa presión alterna periódica debida a la onda acústica es la que se llama presión acústica.

La presión normal o la que se mide en ausencia de ondas se diferencia de la presión acústica en que se relaciona directamente con la amplitud de las oscilaciones y se llama amplitud de la presión acústica, cuya fórmula se presenta a continuación, donde ω es la frecuencia angular:

$$P = ZV = ZwA = \rho c \omega A$$

- Energía acústica específica (E_e): es la energía del medio por unidad de volumen cuando avanza con la velocidad acústica. En la propagación de ondas se produce un transporte de energía pero no de masa.

$$E_e = \frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho c^2} = \frac{1}{2} \frac{P^2}{Zc}$$

- Intensidad acústica (I): Se define como la cantidad de energía que pasa por unidad de área y por unidad de tiempo. Se corresponde con el producto de la energía específica y la velocidad acústica.

$$I = \frac{1}{2} \rho c V^2 = \frac{1}{2} Z V^2 = \frac{1}{2} Z \omega^2 A^2 = \frac{P^2}{2Z}$$

[5]

3.3. TIPOS DE ONDAS ULTRASÓNICAS

Existen varios tipos de ondas ultrasónicas dependiendo de la oscilación con la que responde el material, que forma una red cristalina de partículas, ante una presión.

3.3.1. Ondas longitudinales

Este tipo de ondas viajan a través del material, de tal forma que el movimiento entre partículas se produce de forma paralela a la dirección de movimiento a través de compresiones y tracciones. También es el tipo de onda más utilizada para la materia que estamos estudiando, la detección de defectos en materiales. [6]

Como características concretas se tiene que pueden ser orientadas y localizadas en un haz concentrado y que poseen una alta velocidad, además de ser las únicas que se pueden propagar por medios sólidos, líquidos y gaseosos.

Las ondas longitudinales viajan a través del material donde cada partícula vibra paralela a la dirección del movimiento de la onda como una serie alternante de compresiones y rarefacciones; son el tipo de onda más comúnmente usado para las inspecciones ultrasónicas. [7]



Figura 4 Mecánica de una onda longitudinal

3.3.2. Ondas transversales

En este caso la perturbación se produce en la perpendicular a la dirección de propagación. Existen varios ejemplos de ondas transversales como puede ser las ondas electromagnéticas, las ondas sísmicas tipo S o las ondas que se producen en una cuerda. Se puede apreciar la mecánica de este tipo de propagación en la Figura 5: [8]



Figura 5 Mecánica de una onda transversal

3.3.3. Ondas de Lamb

Este tipo de onda son las más utilizadas en placas de reducido espesor. Dentro de estas se pueden diferenciar a su vez las ondas simétricas, que son aquellas cuya propagación se realiza en dirección longitudinal, y ondas antisimétricas, cuyo desplazamiento se realiza en dirección transversal. Estos dos tipos están presentes en la Figura 6: [9]



Figura 6 Mecánica de una onda de Lamb

3.3.4. Ondas de Rayleigh.

Son un tipo especial de las ondas trasversales que se transmiten a lo largo de la superficie del material. Se propagan sobre la superficie de materiales de espesores gruesos con una penetración equivalente a una longitud de onda. Son una combinación de ondas longitudinales y transversales y son muy utilizadas en ultrasonidos debido a su gran sensibilidad respecto a rugosidades superficiales. [7]

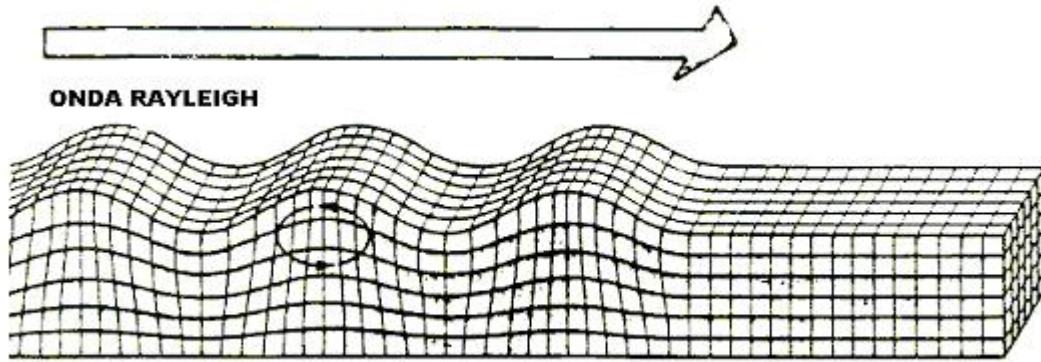


Figura 7 Mecánica de una onda de Rayleigh

En la Figura 7 se puede ver claramente la combinación de ondas longitudinales y transversales que dan lugar a la elipse que se puede observar.

3.3.5. Ondas de torsión.

Este tipo de ondas se dan en estructuras de forma cilíndrica y son oscilaciones rotacionales alrededor del eje de dicho cilindro y su propagación se lleva a cabo en dirección a dicha directriz. [7]

3.4. DESCOMPOSICIÓN DE LAS ONDAS

Cuando una onda pasa de un medio a otro sufre una descomposición, esto quiere decir que se dan diferentes formas de propagación, a continuación se explicarán:

3.4.1. Reflexión

Es el fenómeno mediante el cual parte de la energía de una onda que incide sobre una superficie es reflejada con el mismo ángulo que el de incidencia debido al cambio de medio que se produce por las diferentes propiedades elásticas de cada uno.

En la reflexión hay tres elementos: rayo incidente, línea normal o perpendicular a la superficie y rayo reflejado, como se puede ver en la Figura 8. El ángulo de incidencia es aquel que forma la normal con el rayo incidente y el ángulo de reflexión es el formado por la normal y el rayo reflejado.

La reflexión es la causante del eco en el instrumento de ensayo. [10]

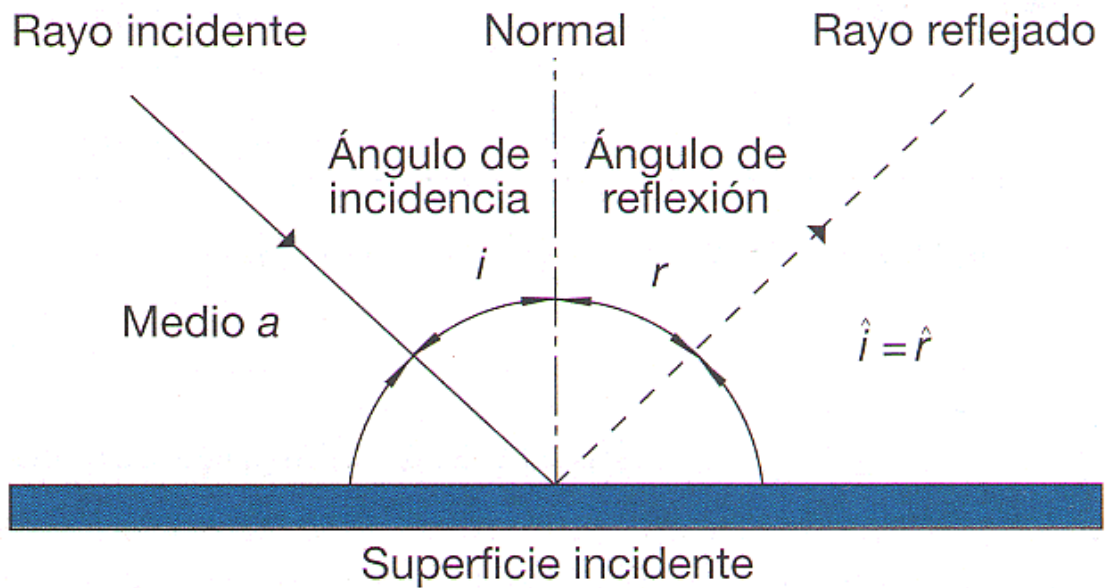


Figura 8 Reflexión de una onda

3.4.2. Refracción

La refracción se produce cuando una onda pasa de un medio a otro y estos tienen índices de refracción distintos y por lo tanto se origina un cambio de velocidad de la onda que provoca que varíe la dirección de propagación (Figura 9).

Una vez que parte de la onda ha penetrado en el material, la parte introducida lleva una dirección diferente a la que ha incidido, pero tal que la relación entre los senos de los ángulos, respecto a la normal, que forma el rayo incidente y el que penetra sea constante (Ley de Snell):

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

Siendo 1 y 2 dos ondas cualquiera con velocidades acústicas c_1 y c_2 . [7]

Según la Ley de Snell, el paso de una onda a un medio con menor índice de refracción provoca que el ángulo de refracción sea mayor que el de incidencia. Por otro lado, el valor máximo que puede tener el seno es 1, es por eso que hay un ángulo de incidencia límite de tal forma que para mayores ángulos la refracción no existe. [11]

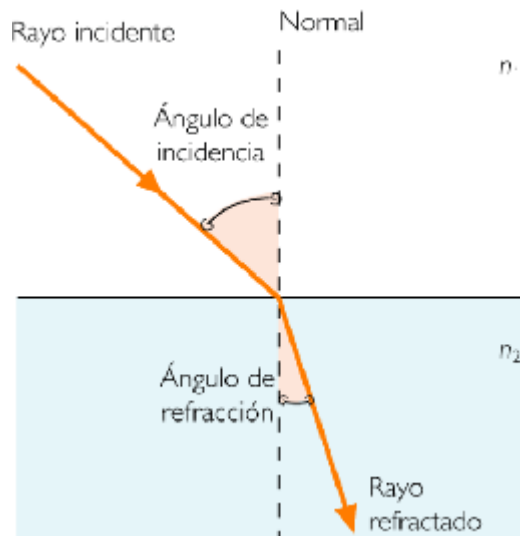


Figura 9 Refracción de una onda

3.4.3. Difracción

Este fenómeno ocurre cuando una onda sonora incide en un cuerpo pequeño o una abertura que posea dimensiones del orden de la longitud de onda, ciertos puntos del frente de onda pueden convertirse en fuentes secundarias de onda.

La difracción se produce por dos motivos, representados en la Figura 10. El primer motivo se da cuando la onda se encuentra con un determinado cuerpo cuya longitud es del orden de la longitud de onda y esta lo rodea. El segundo motivo se produce cuando la onda se encuentra con un orificio, relativo a la longitud de la misma. [7]

Este fenómeno sonoro se rige por la Ley de Huygens, que dice que cualquier punto en del frente de una onda puede a su vez convertirse en un foco emisor de ondas idénticas a la original. Por lo que cuando la onda incide sobre un obstáculo que impide su propagación, todos los puntos de su frente se convierten en nuevos focos de emisión. Estas nuevas ondas se denominan ondas difractadas. [12]

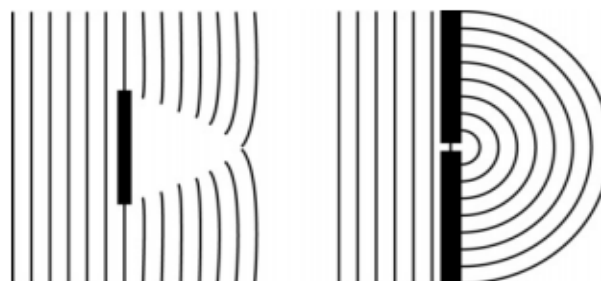


Figura 10 Difracción de una onda

3.4.4. Interferencia

En este caso se produce cuando las ondas de varias fuentes se juntan y se produce un solapamiento y que origina una nueva con propiedades distintas a las que la han originado.

Se diferencia a su vez en interferencia constructiva, que el solapamiento de las dos ondas provoca una tercera de intensidad mayor e interferencia destructiva, que da como resultante una onda de intensidad menor que las que la han provocado. [13]

En la Figura 11 se puede observar la interferencia que se ocasiona al juntarse dos ondas con diferentes focos.

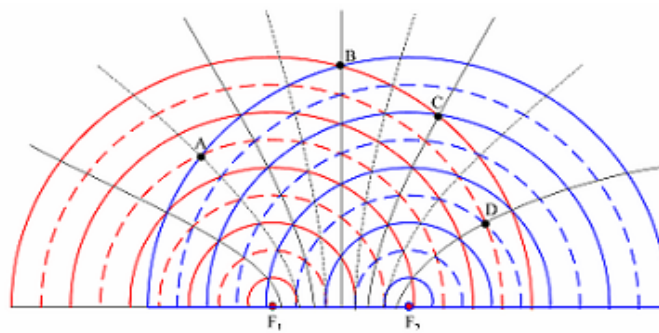


Figura 11 Interferencia de dos ondas

3.4.5. Absorción

En este fenómeno, parte de la energía de onda se transforma en calor debido a la fricción entre las partículas, más intensa cuanto mayor es la frecuencia de la onda. Aparte de la frecuencia, otros factores varían la absorción de una onda como por ejemplo el tipo de material y el tipo de dicha onda. [7]

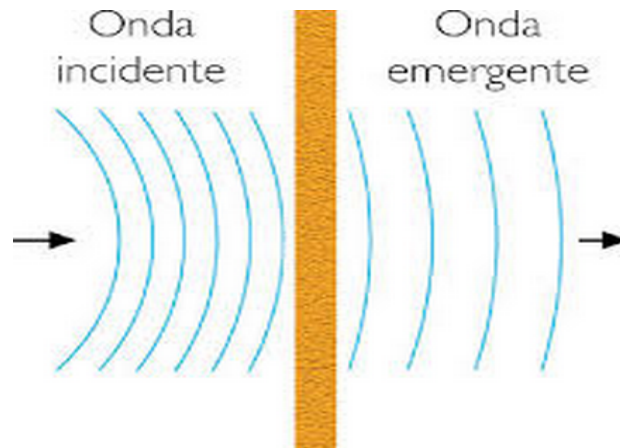


Figura 12 Absorción de una onda

El proceso de absorción viene ilustrado en la Figura 12.

Posteriormente se va a centrar en la aplicación de los ultrasonidos de la que va a tratar el proyecto y que son los ensayos no destructivos.

3.5. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (TRANSDUCTORES)

Esta técnica consiste en la inspección de materiales, haciendo uso de las ondas ultrasónicas, para la detección de discontinuidades dentro del material. Esta técnica se lleva a cabo gracias al uso de un utensilio llamado palpador (Figura 13), que es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en mecánica y viceversa y que se muestra a continuación enumerando sus partes:



Figura 13 Partes de una sonda ultrasónica

El funcionamiento de este dispositivo se basa en la excitación del oscilador mediante la recepción de una pequeña descarga eléctrica que lleva consigo un pulso ultrasónico, que a su vez genera una señal eléctrica que produce su oscilación.

La conversión energética de eléctrica a mecánica y viceversa de la que se ha hablado tiene lugar gracias a dos fenómenos físicos de los que se va a tratar a continuación, el efecto piezoeléctrico y el efecto magnetostrictivo: [3]

3.5.1. Efecto piezoeléctrico:

El efecto piezoeléctrico es aquel fenómeno físico por el que entre las caras de un cristal aparece una diferencia de potencial cuando a este se le somete a una presión. Este efecto también funciona de forma inversa, aparecen distorsiones mecánicas cuando al cristal se le somete a un campo eléctrico.

Este efecto se explica por el desplazamiento que tiene lugar de los iones presentes en los cristales, que a su vez provoca una polarización eléctrica, que acumulada provoca una diferencia de potencial eléctrico. [14]

3.5.2. Efecto magnetostrictivo:

Este fenómeno se usa para mediciones en materiales con frecuencias por encima de 25 kHz y por debajo de 100kHz. Una de las características de este fenómeno es que los materiales pierden la forma debido al campo magnético que actúa sobre ellos y que varían sus dimensiones. Otra característica a tener en cuenta es que se puede utilizar tanto para la generación como para la recepción de ultrasonidos.

Este efecto se da en unos materiales llamados ferroeléctricos, entre los que se encuentran el níquel, el acero y las ferritas. Cuando se somete a un campo eléctrico a estos materiales, las moléculas se van alineando siguiendo la dirección de dicho campo y provocando a su vez un incremento del espesor. [3]

3.6. TIPOS DE ENSAYOS

Existen multitud de métodos de ensayos dependiendo de la técnica que se utilice para realizar los mismos, si por contacto directo o por inmersión, como los vistos en la Figura 14, o manual y automático. Los experimentos que se tratan en este proyecto realizan el método de contacto directo combinado con inspección manual debido a que solamente se cuenta con el equipo necesario para este tipo de ensayos.

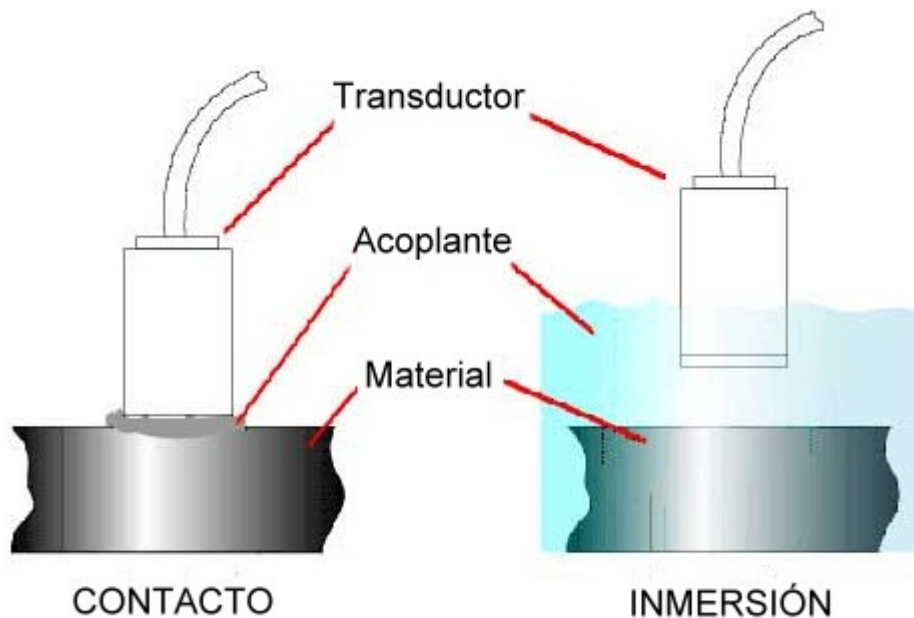


Figura 14 Diferencias entre contacto directo e inmersión.

3.6.1. Método contacto directo:

Este método, como su propio nombre indica, se realiza mediante la presión directa del palpador sobre la superficie a inspeccionar. Para favorecer la buena transmisión de las ondas ultrasónicas se utiliza un gel especial para este tipo de ensayos. Se debe ejercer una presión constante a lo largo de la superficie para que las mediciones sean lo más certeras posibles.

Dentro del contacto directo se pueden diferenciar dos tipos dependiendo del ángulo de incidencia sobre el material. Por un lado se encuentra el método por incidencia normal, en el cual el ángulo de incidencia es de 0° . Por otro lado, el segundo tipo se corresponde con método de incidencia angular que como su propio nombre indica, depende del ángulo de refracción del haz en el material.

Por otro lado, existen numerosos factores que afectan a las mediciones. Estos factores se exponen a continuación:

- Acabado superficial: la presencia de rugosidades en la superficie a medir puede generar variaciones importantes que van a afectar al resultado del ensayo, como por ejemplo la aparición de corrientes parásitas. Se intenta medir en las zonas con mejor acabado superficial para favorecer dichas mediciones.
- Curvatura superficial: debido a la presencia de concavidades y convexidades en el material se producen fallos en la medición, por lo que se utilizan palpadores que se acoplen a la forma del material, como se puede ver en la Figura 15, y así no se produzcan fallos en la transmisión de las ondas ultrasónicas. Si la superficie es cóncava, el palpador hace mal contacto con el material y pierde sensibilidad, y si la superficie es convexa, solamente tiene contacto la parte central de la sonda con el material.

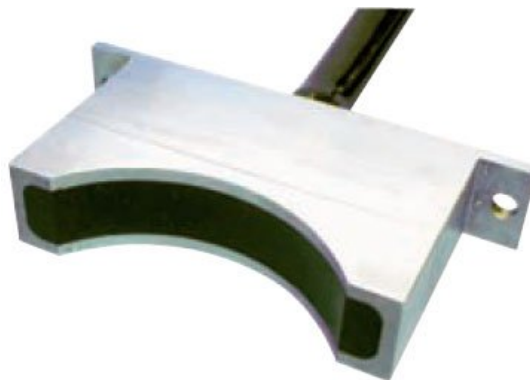


Figura 15 Transductor curvo.

- Medio de acoplamiento: como se ha dicho antes, es necesaria la aplicación de un gel para que la transmisión de las ondas se produzcan de forma satisfactoria, ya que el aire es un medio cuya impedancia es incompatible para la transmisión de este tipo de ondas. [5]

Dentro de los métodos de contacto directo, existen otros dos subtipos, esta vez que dependen de la mecánica de la transmisión de las ondas, como son el método Pulso-Eco y el método de transmisión o de sombra. Se va a centrar en el primero de ellos debido a que es el utilizado en la mayoría de los experimentos:

3.6.1.1. Método Pulso-Eco.

Este método es el que más se emplea para la detección de discontinuidades por ultrasonidos y la mecánica que utiliza es la detección de ecos de los pulsos transmitidos por la sonda y que se reflejan en dicho defecto o en una cara de la pieza a inspeccionar. Mediante este método se puede llegar a conocer parámetros del material como el espesor y la localización del defecto, mediante la determinación del tiempo de vuelo. [15]

Este tipo se puede ver ilustrado en la Figura 16.

La onda penetra el material hasta que, como resultado de una superficie límite, tiene lugar una reflexión total o parcial.

Gracias a la medición del tiempo de vuelo y conociendo la velocidad de propagación de la onda en el material, este método permite establecer la distancia entre el palpador y la superficie reflectante, ya sean los bordes de la pieza o discontinuidades. Por eso este tipo de medición es muy utilizado, a la vez que solo existe una superficie de acoplamiento por lo que resulta mucho más sencillo mantener constante el acoplamiento. [7]

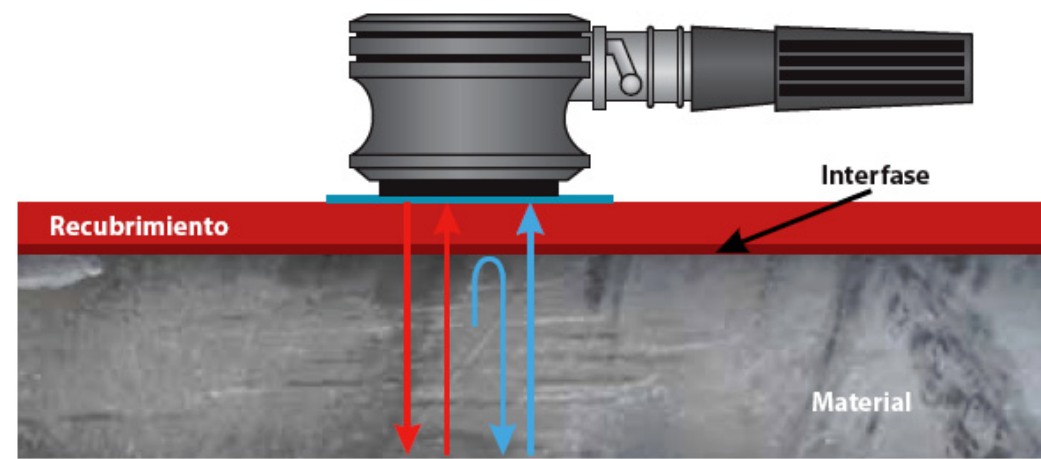


Figura 16 Mecánica método Pulso-Eco.

3.6.1.2. Método de transmisión:

En este método de ensayo se utilizan dos palpadores de tal forma que uno actúa de emisor y el otro de receptor y se sitúan a ambos lados del material a inspeccionar. Se basa en la intensidad del sonido que se propaga a través del material.

Gracias a este método se puede observar la amplitud de los impulsos, que permite conocer la presencia de discontinuidades.

Por otro lado este tipo de inspección se suelen usar en ensayos automáticos por lo que no se usará con la unidad Gampt-Scan. [16]

3.6.2. Método de inmersión:

Este método de ensayo se realiza de tal forma que el acoplamiento entre el transductor y el material es el agua que los rodea. De esta forma el impulso inicial y su eco dependen de la distancia que los separa.

Esta técnica tiene ventajas respecto a las anteriores como es la posibilidad de focalizar el haz ultrasónico, la existencia de un medio acoplante uniforme entre sonda y pieza a inspeccionar y también permite una fácil automatización del ensayo permitiendo registrar los resultados. [16]

Una desventaja frente al contacto directo es que no se podrán inspeccionar objetos de gran tamaño, además a la disminución de la amplitud de las señales que recibimos debido a la reflexión de la onda que se produce en el agua. [5]

Dentro de este método existen otros tres sub-tipos que son la inmersión en tanque, el sistema de chorro de agua y el sistema de rueda:

3.6.2.1. Inmersión en tanque:

La pieza de estudio se sumerge directamente en un tanque de agua (Figura 17) normalmente con aditivos anticorrosión, actuando esta como medio transmisor de las ondas. Este método permite la inspección de piezas con superficies irregulares. [5]



Figura 17 Tanque de inmersión.

3.6.2.2. Sistema de chorro de agua:

En este caso se produce una inmersión local en el cual el palpador se introduce en una carcasa que hace contacto con la superficie llena de líquido que actúa de medio de acoplamiento. [5]

3.6.2.3. Sistema de rueda:

Este sistema consiste en una rueda de caucho delgada llena de agua dentro de la cual se fija el palpador. [5]

3.7. REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Cuando se realiza la inspección de un material, se proporciona una serie de datos en forma de representaciones, las cuales pueden ser de tres tipos: A-Scan, B-Scan y C-Scan.

Se va a centrar en las de tipo A debido a que son las que se van a utilizar a lo largo de todo el proyecto. Aún así, se introducen someramente los otros dos tipos de representaciones.

3.7.1. Representación A-Scan

En este tipo de representación, el sonido viaja a través del material y al rebotar sobre un defecto o una cara de la pieza se analiza la onda para conocer características del defecto en este caso, como puede ser el tamaño y la profundidad a la que se encuentra.

La altura en el diagrama está relacionada con el tamaño del defecto, mientras que la posición en el eje horizontal está relacionada con la profundidad a la que se encuentra dicho defecto.

Para conseguir precisión en las mediciones se tendría que realizar una calibración con un bloque patrón que permita posicionar la discontinuidad con precisión. [17]

Se puede observar la mecánica de este tipo de representación en la Figura 19.

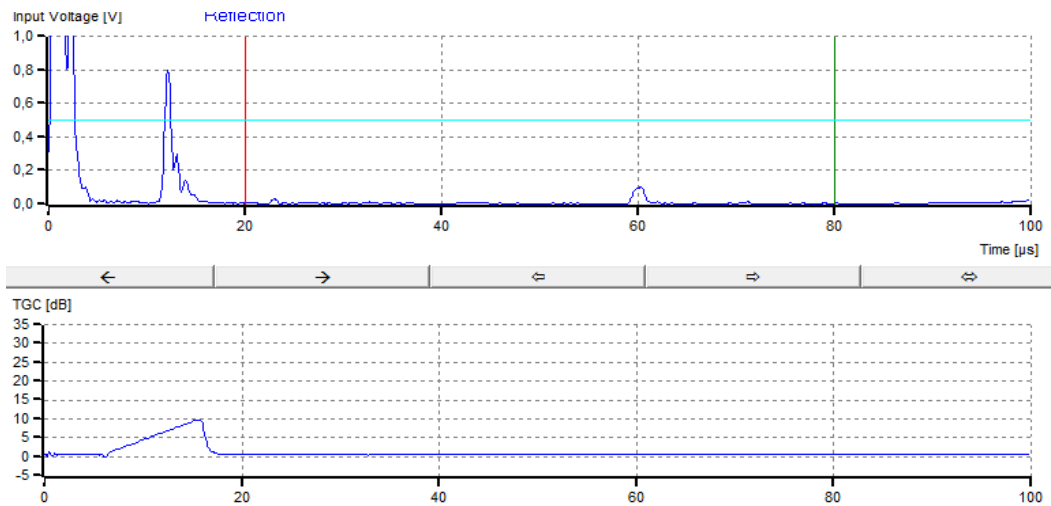


Figura 18 Diagrama obtenido a través del Gampt-Scan.

En la Figura 18 se puede observar una representación real obtenido en uno de los experimentos realizados en el equipo de ultrasonidos.

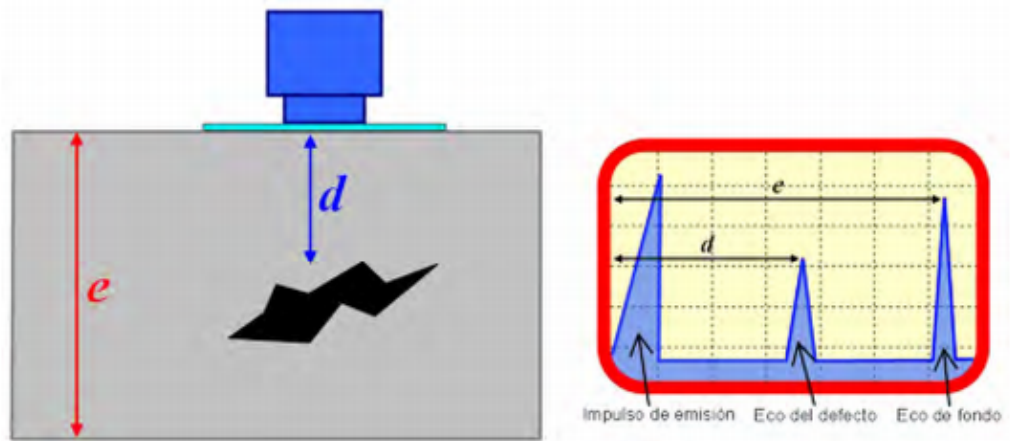


Figura 19 Mecánica de la representación A-Scan.

3.7.2. Representación B-Scan

En este caso se representan los espesores obtenidos frente a la distancia recorrida por el palpador o frente al tiempo. Gracias a esto se puede obtener un corte transversal de la pieza inspeccionada. [17]

3.7.3. Representación C-Scan

Gracias a este tipo de representación se obtiene una imagen tridimensional de los espesores, mediante la cual se muestra una vista en planta de la pieza con la discontinuidad incluida. [5]

En las páginas anteriores se ha procedido a introducir el tema del que trata el proyecto, en este caso los ultrasonidos, y a partir de ahora se comienza a realizar el verdadero cometido de este trabajo, y es la realización de un manual de uso para un equipo de detección de defectos mediante ultrasonidos.

En primer lugar se procede a describir el equipo utilizado y posteriormente se pasa a la realización de los ensayos específicos.

4. PARTE EXPERIMENTAL Y DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Esta parte del proyecto es la más importante del trabajo y en la que más tiempo se emplea, debido a que el fin último de la puesta en marcha del equipo es precisamente la parte en la que se realizan experimentos y ensayos para así poder comprender el funcionamiento del equipo.

Dentro de este capítulo se pueden diferenciar dos subcapítulos. Por un lado se procede a realizar una descripción del equipo, incluyendo los componentes y la utilización del programa. Por otro lado se realizara la parte experimental del trabajo, en la que se lleva a cabo los diferentes ensayos propuestos, de los que posteriormente se extrae un guión para la realización de parte de una práctica por parte de los alumnos de la asignatura de Tecnología de Materiales.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El Gampt Scan (Figura 20) es un sistema de alta sensibilidad de medición a través de ultrasonidos que puede ser conectado tanto a un ordenador como a un osciloscopio para representar los datos de las mediciones.

Tiene multitud de modalidades de representación de las señales como puede ser B-mode, M-mode, análisis espectral, señales HF, etc.

Las sondas ultrasónicas se conectan mediante conectores robustos y la frecuencia de cada una de ellas se reconoce automáticamente al enchufarla a la unidad de control. Para la configuración de los experimentos de laboratorio hay una extensa selección de sondas de ultrasonidos (1, 2 y 4 MHz) y accesorios. De esta manera el área temática va desde físicamente conceptos básicos de la ecografía hasta aplicaciones industriales y médicas.

La elaboración de la descripción del equipo está apoyada por un manual de uso específico del equipo Gampt-Scan.



Figura 20 Kit de ultrasonidos Gampt-Scan.

Instrucciones generales de uso:

- Conecte el equipo solo a una red de corriente alterna de entre 100 y 250 voltios.
- No obstaculice las salidas de aire del dispositivo para evitar una mala refrigeración.
- Nunca trate de introducir objetos en los ventiladores del equipo ya que puede provocar cortocircuitos.
- Al retirar los palpadores y cualquier otro cable no tire nunca del propio cable, utilice siempre las agarraderas dispuestas para este fin.

- Antes de utilizar los palpadores cerciórese de que están en buen estado. Evite usar aquellos que están en mal estado. En este caso sustitúyalos solo por aquellos que estén fabricados por la compañía GAMPT.
- Tenga en cuenta que este equipo no es de uno médico, por lo tanto evite usarlo en seres humanos

4.2. COMPONENTES

4.2.1. Unidad de control:

Datos técnicos:

- Dimensiones: 225x170x315 mm.
- Frecuencia: 1-5 MHz.
- Conexión al PC: USB.
- Modos de medición: reflexión y transmisión.
- Señal de Transmisión: 10-300 V.
- Ganancia: 0-30 dB.

Esta unidad de control es un dispositivo de exploración ultrasónica (A-Scan) con una salida para la operación de pulso-eco y una salida adicional que puede alternarse para el funcionamiento de dos sondas en modo de transmisión.

A continuación se ha realizado un esquema con los componentes con los que cuenta este dispositivo, visualizado a través de la Figura 21:

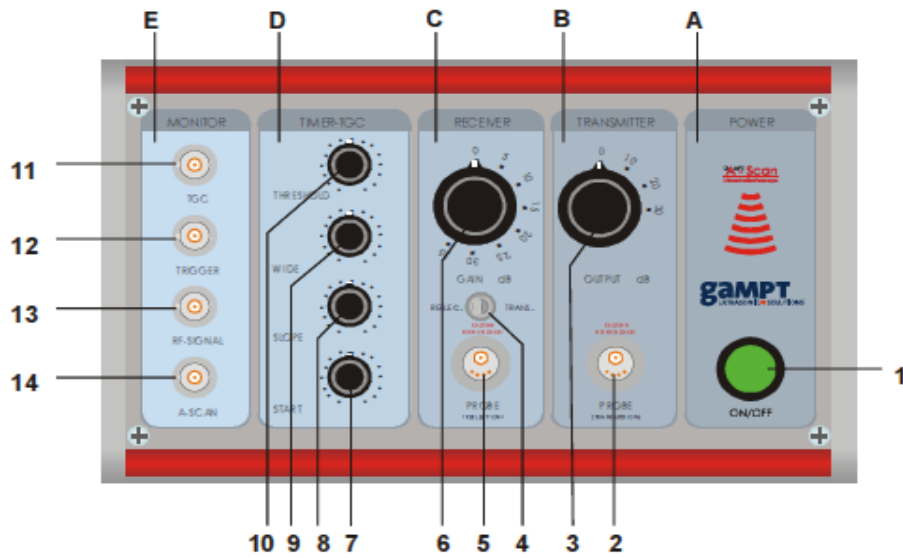


Figura 21 Panel de mandos de la unidad de control.

- A power (fuente de alimentación)
 - 1. on/off
- B transmitter (transmisor)
 - 2. Conector sonda de transmisión
 - 3. Potencia emitida
- C receiver (receptor)
 - 4. Interruptor reflexión/transmisión
 - 5. sonda de modo conector reflexión o el receptor en el modo de transmisión
 - 6. amplificador receptor
- D Time Gain Control (TGC) (tiempo control de ganancia)
 - 7. start (punto de comienzo)
 - 8. slope (alto)
 - 9. width (ancho)
 - 10. threshold (límite)
- E Monitor (salidas osciloscopio)
 - 11. señal TGC
 - 12. señal trigger
 - 13. señal AScan HF
 - 14. señal AScan NF

4.2.2. Sondas/palpadores:

Estos dispositivos son los que están en contacto con el material y son los encargados de detectar las discontinuidades mediante el envío y la posterior recepción de una señal que viaja a través del material. Todas las sondas tienen una caja de metal robusta y son resistentes al agua. En este proyecto se trabaja con tres tipos de sondas (Figura 22) dependiendo de la frecuencia con la que actúen:

- Sonda azul: esta sonda se corresponde con la de 1 MHz y está especialmente diseñada para inspecciones de gran profundidad debido a su alta intensidad de sonido. Su uso está recomendado en materiales de amortiguación fuerte y para la generación de Rayleigh y ondas de corte. Pueden ser utilizadas tanto como transmisor como receptor.
- Sonda roja: en este caso la sonda roja es la de 2 MHz, lo que permite abarcar una amplia gama de intensidades. Es la idónea para inspecciones a profundidad media, por lo que su uso mayoritario se corresponde al campo de la medicina, aunque también para uso industrial.
- Sonda verde: este tipo de sondas son las de 4 MHz y su uso está especialmente indicado para objetos pequeños y superficies o placas de espesores reducidos. Puede desarrollar una alta resolución.



Figura 22 Tipos de palpadores utilizados en la unidad de control.

4.2.3. Bloques de pruebas:

Sobre estos bloques se realizan las mediciones de los distintos experimentos sobre los que trata el proyecto.

- **Bloque transparente:**

El bloque transparente (Figura 23) de pruebas esta hecho de un material acrílico homogéneo especialmente diseñado para investigaciones de ondas eco. Este material tiene una atenuación acústica media, por lo que puede ser utilizado para hallar la profundidad de los defectos con cualquiera de las tres sondas disponibles. Estos defectos están repartidos a lo largo de todo el bloque y en todas las profundidades.

Datos técnicos:

- Dimensiones: 150mm x 80 mm x 40 mm
- Material: acrílico, transparente.
- Velocidad del sonido: 2700 m/s (longitudinal)
- Densidad: 1.2 g/cm^3
- Número de defectos: 11

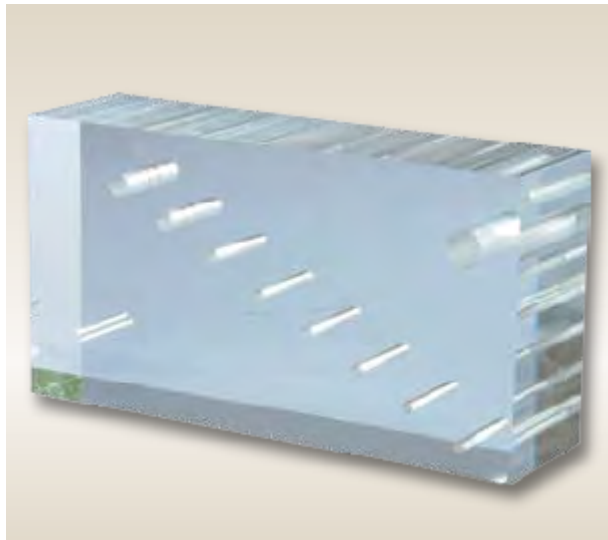


Figura 23 Bloque Transparente de metacrilato

- **Cuña de haz angular:**

La cuña de haz angular (Figura 24) es uno de los utensilios más importantes en las pruebas no destructivas con ultrasonidos. El ángulo de refracción para la onda longitudinal y la onda de corte resulta de la velocidad del sonido de la cuña

y del material de prueba en conjunción con las leyes de la refracción. Esta cuña puede ser utilizada para cualquiera de las tres sondas de las que se dispone.

Datos técnicos:

-Material: acrílico.

-Velocidad del sonido: 2700 m/s

-Ángulo: 18 Y 37 grados.



Figura 24 Cuñas de haz angular.

- **Bloque de prueba de profundidad de la grieta:**

El bloque de pruebas contiene grietas a diferentes profundidades, como se puede observar en la Figura 25. Usando dos técnicas de medición se puede determinar la localización y la profundidad de las grietas. Estos dos métodos son el de haz angular, utilizado para grietas para todo tipo de grietas, y el método TOFD, utilizado para grietas más grandes.

Datos técnicos:

-Material: aluminio.

-Velocidad del sonido: 6400m/s (longitudinal) y 3100 m/s (transversal).

-Profundidades de las grietas: 2, 4, 6, 8, 10 y 15 mm.

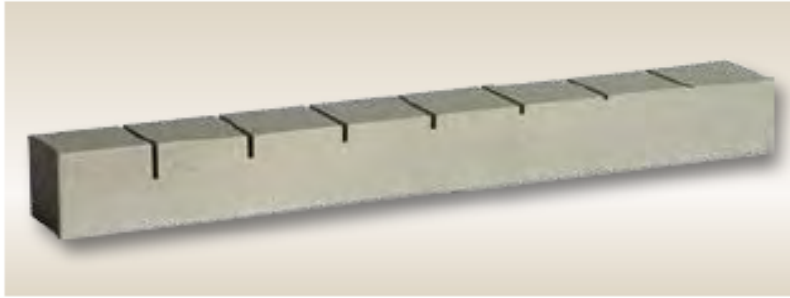


Figura 25 Bloque de pruebas de aluminio con grietas.

- **Bloque de pruebas de discontinuidad:**

El bloque de aluminio contiene diferentes tipos de reflectores, que se pueden diferenciar en la Figura 26 y que pueden ser usados para producir ecos. Están diferenciados cinco reflectores tipo espejo y un reflector tipo grieta. Los de tipo espejo incluyen tres cilindros, un disco, una grieta vertical y una grieta oblicua.

Datos técnicos:

- Material: aluminio.
- Velocidad del sonido: 6400 m/s (longitudinal) y 3100 m/s (transversal)
- Dimensiones: 35 mm x 35 mm x 300 mm
- Número de discontinuidades: 6

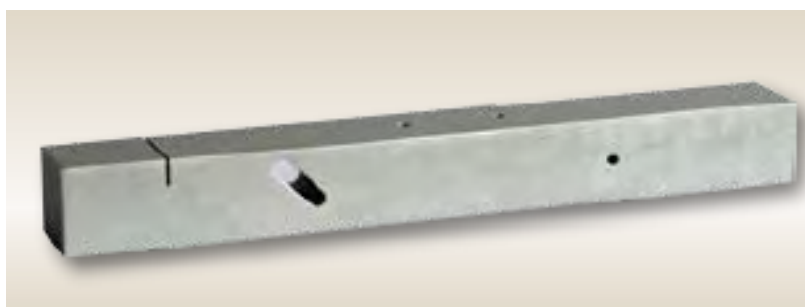


Figura 26 Bloque de pruebas de aluminio con diferentes defectos.

- **Transceptor de línea de retardo (TOFD):**

Para poder utilizar el método TOFD (Figura 27) se utiliza un ensayo especial que requiere el uso de una sonda transmisora y una sonda receptora, que están dispuestas sobre la superficie con un ángulo determinado provisto gracias a este transceptor.

Este elemento no se usa debido a que no se dispone de la sonda pertinente para realizar los experimentos con este transceptor.

Datos técnicos:

-Material: acrílico.

-Velocidad del sonido: 2700 m/s.

-Ángulo de incidencia: 38 grados.



Figura 27 Doble cuña de haz de ángulo.

4.3. SOFTWARE

4.3.1. Programa:

El A-Scan software sirve para grabar, visualizar y evaluar los datos suministrados por la GAMPT-Scan. Al lado de la visualización de los datos en los diagramas, hay diferentes funciones de evaluación y filtrado. Junto al modo de medición normal, el programa tiene un modo de simulación sin conexión. Esta simulación se activa automáticamente cuando se conecta sin el aparato. (Ver también el capítulo “Transferencia de datos”).

Otras opciones de software son:

- El interruptor entre el tiempo de vuelo y las mediciones de profundidad en función de la velocidad del sonido.
- Funciones de zoom, exportación de datos e impresión.

- Análisis de frecuencia y Cepstrum (FFT).
- Área de señal seleccionable, filtro de frecuencia.
- Modo Time Motion.
- Imágenes en modo B.

Después de iniciar el programa, el modo de medición se activa automáticamente y el modo principal A-Scan de pantalla queda abierto. A partir de aquí se seleccionan todas las acciones y evaluaciones posibles.

4.3.2. Pantalla principal:

La pantalla principal se muestra en la Figura 28. En la parte superior de la pantalla se muestra multitud de información y parámetros como la señal A-scan, la frecuencia del transductor conectado, el modo (reflexión / transmisión) y la posición real de los cursores de línea (líneas roja y verde). Los cursores se pueden colocar con el ratón o con el teclado (teclas de dirección: izquierda + derecha: cursor1, arriba + abajo: cursor2).

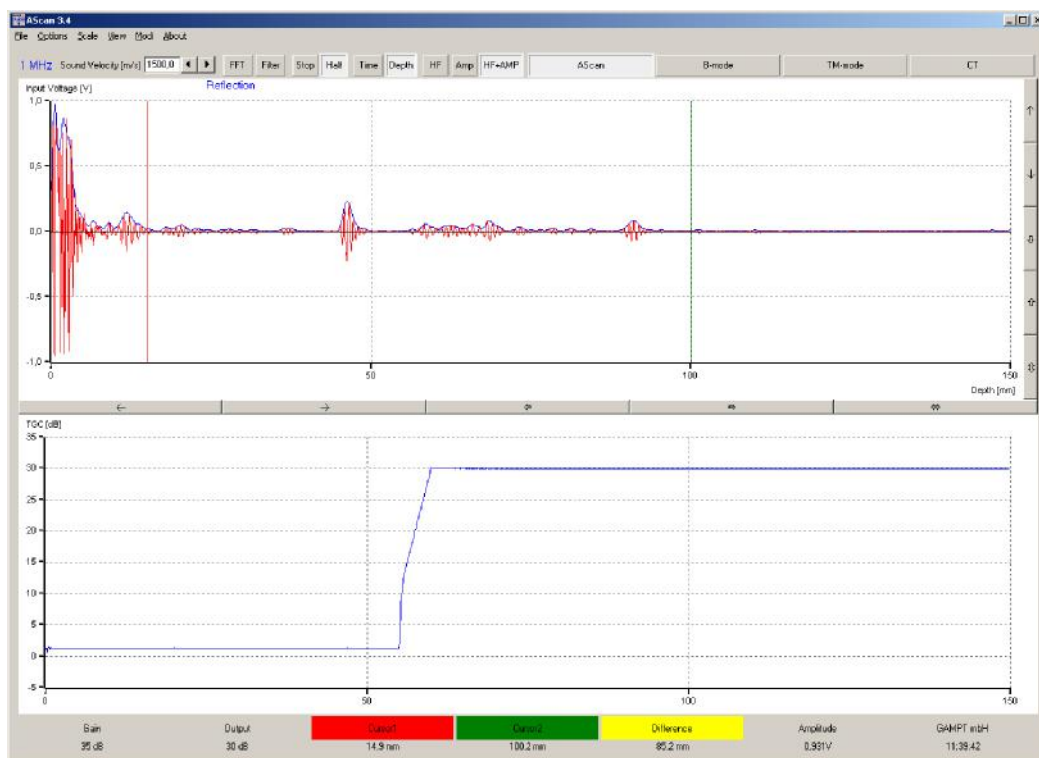


Figura 28 Pantalla principal de Gampt-Scan.

La escala del eje x se puede cambiar de escala de tiempo (tiempo de medida de vuelo) a escala de profundidad (Botones: Tiempo **Time** o Profundidad **Depth**).

Para el cálculo de la escala de profundidad es necesaria la velocidad del sonido. Este valor se va a editar en el campo de entrada correspondiente (por defecto 1500 m/s para el agua). El botón con las flechas arriba/abajo situado a la izquierda junto a la diagrama sirve para la resolución de amplitud y para mover la línea de cero (par inferior).

La restauración permanente de la línea A-scan puede ser interrumpida por el botón **Stop** (congelación) y puede dar comienzo de nuevo con el botón **Start**.

Con los botones Half/Full (**Half** / **Full**) del rango de medición (tiempo máximo de vuelo o profundidad) se puede cambiar entre 100 μ s o 200 μ s.

Para la visualización de los valores medidos en el diagrama A-scan, se puede seleccionar si queremos solamente amplitud (rojo), datos HF (azul) o ambos. La selección se realiza con los botones **Amp**, **HF** o **HF+Amp**. (Menú alternativo **View**).

En la Figura 29 se muestra el tiempo de control de ganancia (TGC) con todos los parámetros (punto inicial, altura, anchura y umbral). Los efectos TGC sólo tienen un rango de tiempo seleccionable. La ganancia sólo funciona en este intervalo de tiempo. De esta manera la pendiente se puede cambiar de posición, anchura y altura. Con él, es posible hacer hincapié en las zonas especialmente interesantes y también para suprimir las señales borrosas o con interferencias, es decir se utiliza este diagrama para poder realizar un estudio más preciso del diagrama superior (DGS) centrándose en las zonas de interés.

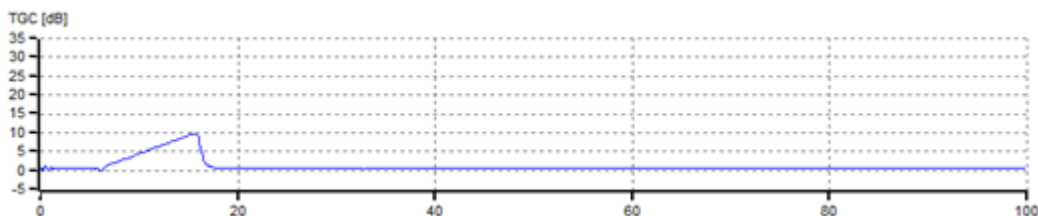


Figura 29 Diagrama TGC

Entre los diagramas hay un panel de botones con flechas diferentes (Figura 30). Estos botones de flecha sirven la función de zoom en el eje x. Los dos primeros movimiento sirven para desplazar el eje hacia la izquierda y la derecha, los dos siguientes son para acercar y alejar. La flecha doble realiza una autoescala del eje x. Esto se mantiene activo hasta que se seleccione otra flecha o el rango de medición haya cambiado. Las flechas junto al diagrama sirven para la misma función, solo que respecto al eje y.



Figura 30 Barra de desplazamientos en el diagrama.

Para introducir valores en el programa hay campos como la velocidad del sonido. Se puede variar este valor usando la interfaz mostrada a continuación en la Figura 31:

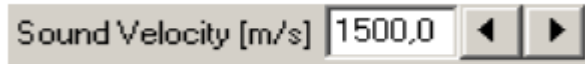


Figura 31 Selector de velocidad del sonido.

4.3.3. Menú de opciones:

4.3.3.1. Parameter (Parámetros):

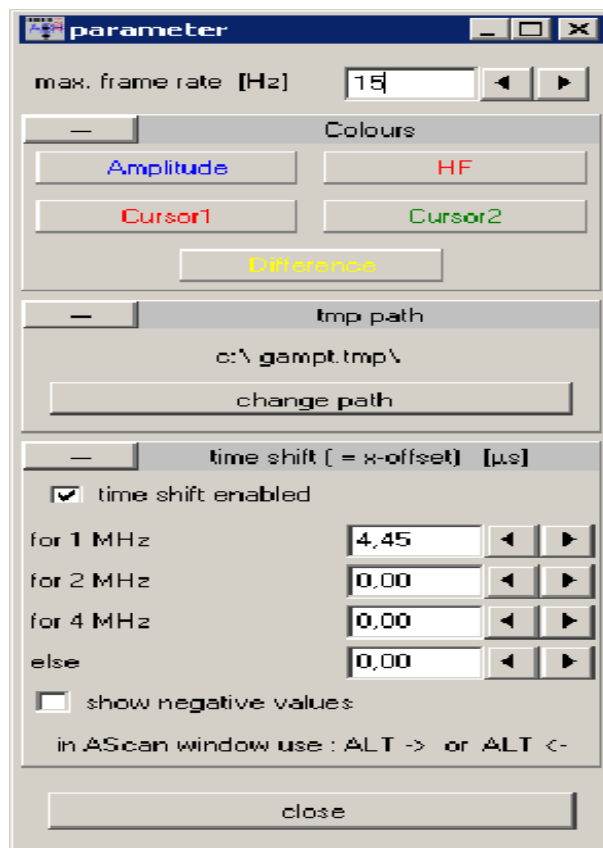


Figura 32 Interfaz de parámetros

El apartado **Max. frame rate** hace referencia a la frecuencia de datos que se transfieren desde el dispositivo y se muestra en los diagramas. El valor dado es solo un punto de referencia. Hay que tener en cuenta que la transferencia de datos necesita de un tiempo concreto.

Por otro lado, en la sección de **colours** podemos variar el color de los cursores o las líneas del diagrama. Para ocultar esta sección hay que pulsar el botón



Otro parámetro que se puede variar gracias a este menú de opciones (Figura 32) es el **tmp path** que permite almacenar multitud de datos como la velocidad del sonido además muchos otros. Normalmente los alumnos no tienen acceso de escritura a los directorios del programa, por lo que no pueden escribir los datos. En este caso los datos se escriben en **tmp path**, y mientras se ejecuta el programa se funciona con estos datos.

Por último se encuentra la opción **Time shift**, mediante la cual se ejecuta un desplazamiento de los datos que se muestran en el eje x. Esta función resulta útil para algunas medidas de tiempo absoluto(es decir, para compensar una línea de retardo de tiempo). Para cada valor de frecuencia del transductor se puede editar esta opción de cambio de tiempo.

4.3.4. Transferencia de datos:

El programa tiene que saber de dónde proceden los datos. Para esta función se tiene que ajustar la transferencia de datos. El dispositivo se puede conectar a través de la interfaz de puerto paralelo (LPT), así como a través del puerto USB. La elección respectiva se puede realizar a través de la pestaña **Options** y dentro de ella en **Data Transfer** (Figura 33).

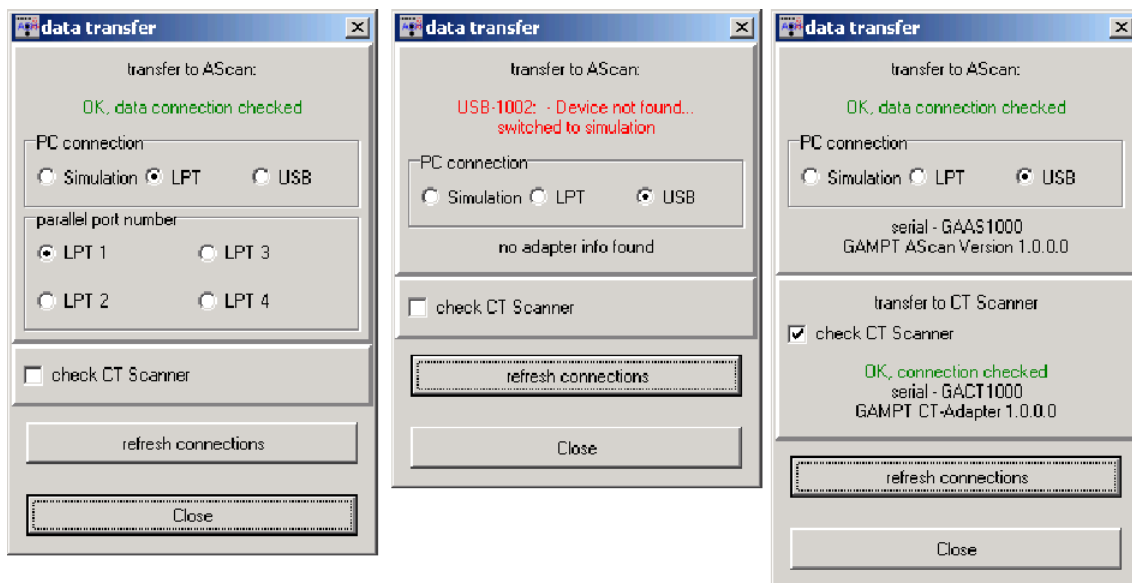


Figura 33 Opciones de transferencia de datos.

El programa comprueba la conexión y cuando se tiene éxito se da el resultado en letras verdes. Cuando no hay conexión del software muestra un mensaje de error en letras rojas con la razón probable. En este caso, el programa cambia automáticamente al modo de simulación. En el modo de simulación de los datos, estos se generan en el ordenador y con este modo también funciona sin el dispositivo, pudiendo ser utilizado para una demostración. El programa

permanece en el modo de simulación hasta el próximo chequeo de transferencia de datos exitoso.

El programa guarda la elección real de transferencia de datos, por lo que no es necesario editarlo cada vez que se inicia el programa.

Si la opción **check CT scanner** se activa también se comprueba la conexión con el escáner. La opción debe ser activada sólo cuando hay un escáner.

Cuando no se pueda establecer ninguna conexión, se recomienda ir paso a paso, sobre todo mediante el uso de un adaptador USB:

- 1 Primero apagar los dispositivos, quitar todo el cable de datos y el adaptador.
- 2 Ahora conecte el dispositivo adaptador USB, el cuál debería reconocerse en este momento.
- 3 Conectar el dispositivo y encenderlo, refrescar la conexión.
- 4 Cuando hay un escáner realizar los mismos pasos.

4.3.5. Análisis de frecuencia:

Fast Fourier Transformation (Figura 34):

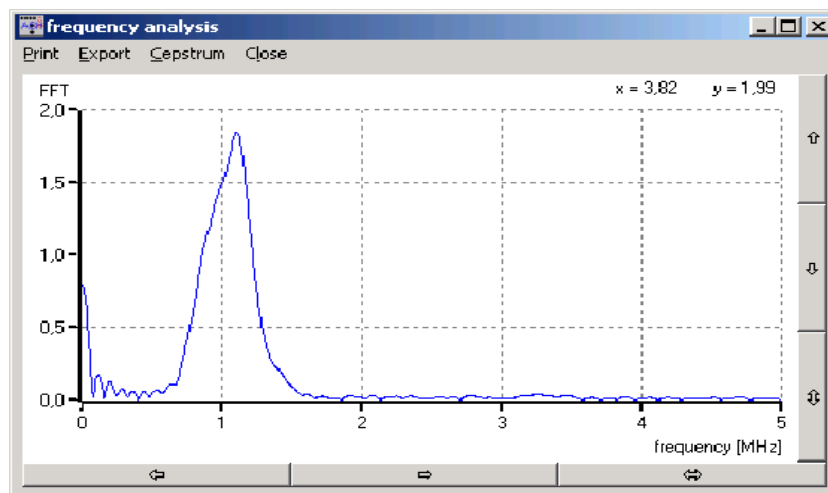


Figura 34 Análisis de frecuencia.

Seleccionando el botón FFT se encuentra la evaluación de análisis de frecuencia. Para ello, el espectro de la línea de exploración se calcula con ayuda de un F (ast) F (ourier) T (ransformation). Para el cálculo del espectro sólo se utilizan los valores entre el cursor rojo y verde. Con ella se obtiene una información sobre las frecuencias que se producen en la señal de medida. Al mover el puntero del ratón en el nuevo diagrama muestra los valores calculados en la posición del ratón en la esquina superior derecha.

4.3.6. Métodos de Imagen:

Con el dispositivo GAMPT-Scan no sólo se puede obtener una representación tridimensional, también es posible generar imágenes bidimensionales. En este capítulo se presentan los métodos de imagen distintos al que se utilizan en los experimentos (A-Scan) para dar a conocer todos los usos que se pueden desarrollar con el equipo aparte de los que trata el proyecto.

4.3.6.1. Time Motion Mode (Modo TM):

En la Figura 35 se muestra el **Time Motion Mode**. En la parte derecha de la imagen se puede ver la pantalla principal a escala reducida que se puede desactivar u ocultar en la opción del menú **Signal View**.

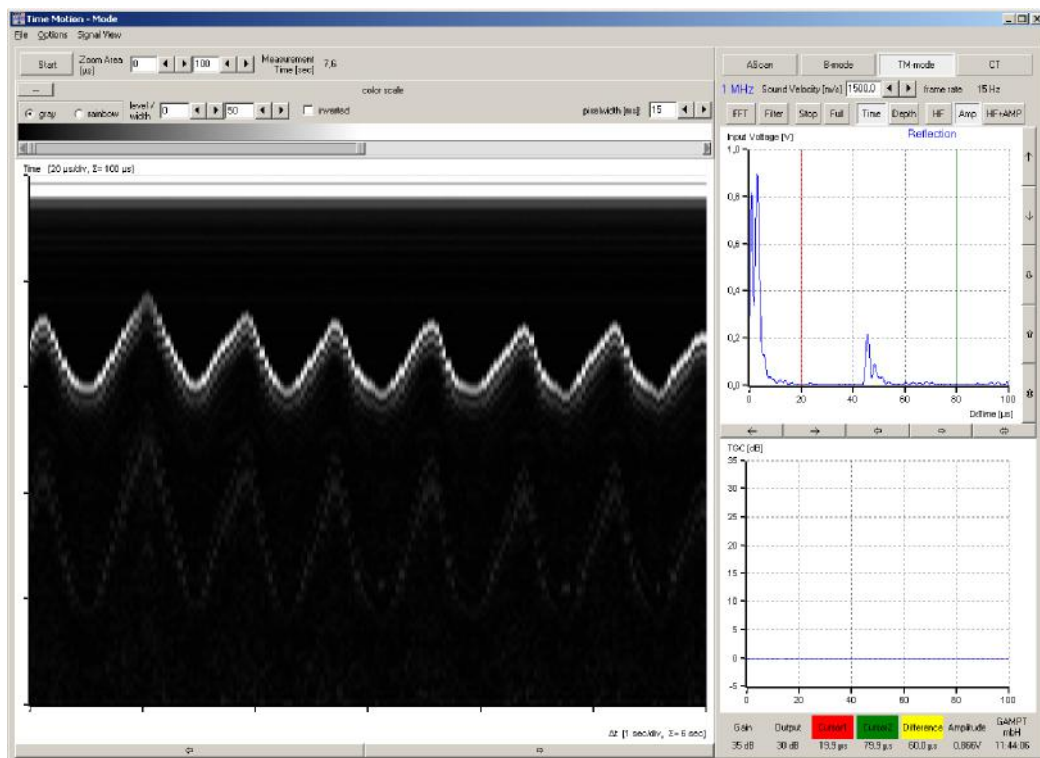


Figura 35 Modo de imagen Time Motion

Con el botón **Start** se comienza la medición y esta dura hasta que se selecciona la opción de detener con el botón **Stop**.

El eje Y representa el tiempo de vuelo o la profundidad, el eje x es una medida para el tiempo de medición. La imagen de arriba muestra los últimos seis segundos de medición.

Una vez finalizada la medida de la imagen, esta se puede evaluar. Al mover el puntero del ratón sobre la imagen muestra las coordenadas x-y reales sobre el diagrama. La anchura de la sección del tiempo se puede cambiar con las flechas de la parte de abajo de la imagen.

Con ayuda de la opción **Zoom Area** es posible ampliar la imagen en la dirección del eje y. En el área de **Color Scale** se puede cambiar la apariencia de la imagen, al igual que es posible variar el contraste haciendo selección en la barra **level/width**.

4.3.6.2. Brighthouse Mode (Modo B):

La visualización y las funciones de este modo son muy similares a las del modo TM, como se puede visualizar en la Figura 36.

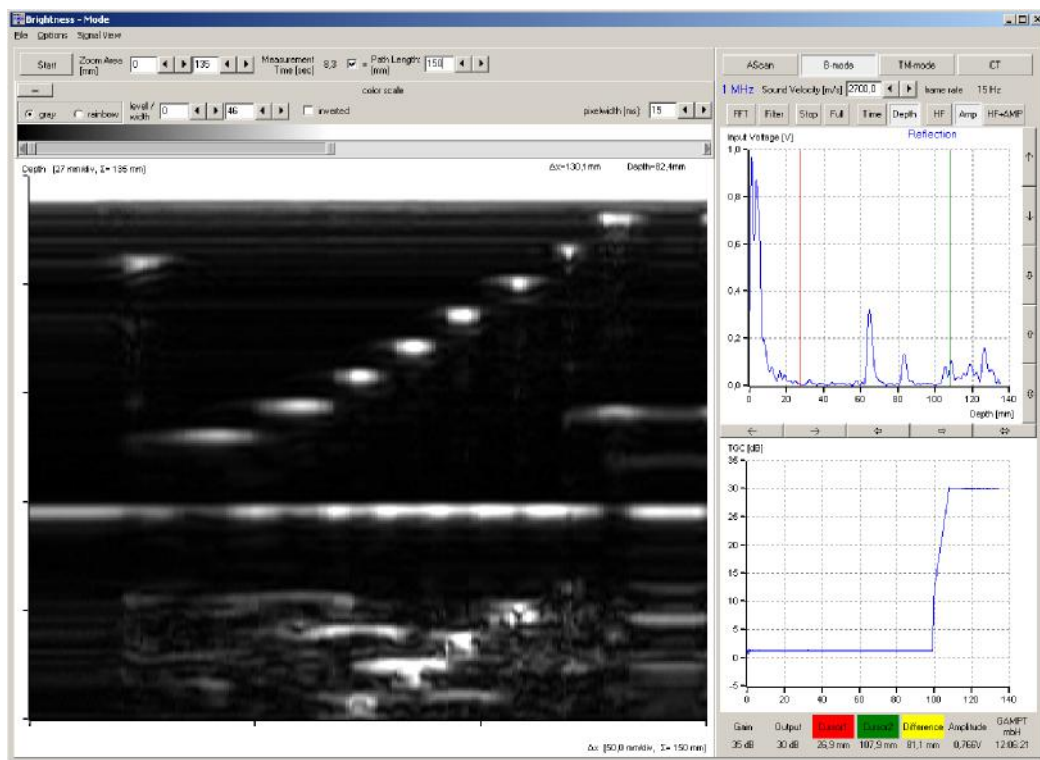


Figura 36 Modo B de imagen

En el modo B hay una manera de asignar el tiempo de medición con coordenadas locales o distancias, por lo que ahora los tiempos en el eje x se pueden convertir en distancias.

Tanto en el modo TM como en el B, en el eje **y** de la imagen se muestra el tiempo de vuelo. Para mostrar la imagen correcta se tiene que elegir la velocidad correcta del sonido en el material sondado.

4.3.6.3. Computer tomography CT (Tomografía):

En la siguiente ilustración se demuestra la diferencia entre un CT "estándar" de rayos X y el CT del dispositivo GAMPT:

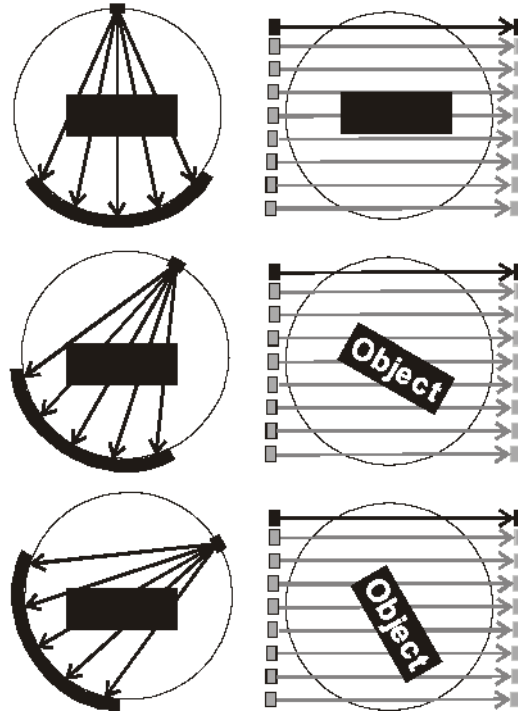


Figura 37 Distribución CT Scanner.

En una CT de rayos X un emisor irradia a través del objeto, la radiación atenuada se registra por un receptor detrás del objeto en varios puntos simultáneamente. Ahora el sistema receptor-transductor gira alrededor del objeto y se inicia el siguiente ciclo. Esto se repite hasta que se alcancen todos los ángulos necesarios.

En la CT de ultrasonidos sólo hay un receptor. Se puede medir la intensidad atenuada solamente en un punto. Es por eso que para cada ángulo se tiene que medir la intensidad en serie en varias posiciones. La distancia de estas posiciones es la precisión y su suma la trayectoria de exploración.

4.4. EXPERIMENTOS PROPUESTOS:

En este apartado se procede a realizar la parte experimental del proyecto. Esta consiste en la ejecución y explicación de una serie de experimentos previamente seleccionados. Debido a

falta de material, no se ha podido realizar todos los experimentos que se presentan después, aunque se procede a realizar una introducción acerca de los mismos.

Basándose en el conocimiento de las características físicas de las ondas de ultrasonidos, los experimentos se llevan a cabo en bloques de ensayo especiales.

Los experimentos y mediciones con este conjunto lo convierten en idóneo para poder ofrecer a los estudiantes una clara introducción en los problemas de las pruebas de ultrasonido y son por lo tanto interesantes para el entrenamiento en casi todos los campos de la ingeniería.

Por otro lado, los resultados obtenidos en los siguientes experimentos no pueden ser considerados en ningún caso como precisos debido a que, por un lado, están orientados para uso estudiantil con lo que carecen de precisión industrial, y por otro lado, se debería realizar una calibración para que los resultados se asemejen lo más posible a los valores reales.

Los experimentos capaces de llevarse a cabo con esta máquina se dividen en varios subtipos dependiendo del fin para los que se utilicen:

- PHY (Physics): incluyen las bases de generación, expansión e interacción de los ultrasonidos.
- MED (Medicine): estos experimentos están encaminados hacia aplicaciones médicas exclusivamente.
- IND (Industry): incluyen las aplicaciones industriales, como por ejemplo los ensayos no destructivos.

Los experimentos se centran exclusivamente en los de tipo PHY y en los de tipo IND debido a que son los más interesantes en el campo de la ingeniería.

Dentro de cada experimento se sigue una serie de pautas para mejorar la explicación de los mismos.

- Propósito: describe los objetivos de aprendizaje de cada experimento, así como el conocimiento y habilidades que esperamos que se obtengan.
- Bases: dan una breve introducción teórica acerca del experimento.
- Setup: informa acerca del equipo requerido y del funcionamiento a partir de fotografías.
- Procedimiento: trata sobre el funcionamiento práctico de cada experimento, las mediciones tomadas y algunos errores posibles.
- Resultados: como su nombre indica da los resultados de las mediciones en forma de gráficas y tablas.

Por último, hay que dejar claro que se trabaja con un equipo de uso estudiantil exclusivamente, es decir, no se puede llegar a unos resultados del todo precisos debido a la falta de calibración del equipo principalmente, y por otro lado a la falta de conocimiento técnico a la hora de realizar estos métodos de medición. Por estos

factores se puede decir que el equipo tiene una misión MÁS CUALITATIVA QUE CUANTITATIVA.

4.4.1. PHY06 Dependencia de frecuencia de poder de resolución:

Los métodos de investigación con sistemas de ultrasonidos se basan en la asignación exacta de la información en un punto del área de la probeta para una onda ultrasónica. Debido a esto, el poder de resolución de las sondas ultrasónicas es enormemente importante. El poder de resolución puede ser descrito como la menor distancia posible entre dos puntos de los ecos, los cuales todavía se pueden detectar por separado. En el experimento, se investigan dos discontinuidades vecinas de un bloque de prueba utilizando una sonda de 1MHz y una sonda de 4MHz.

Los componentes necesarios para la elaboración de este experimento se pueden apreciar en la Figura 38:

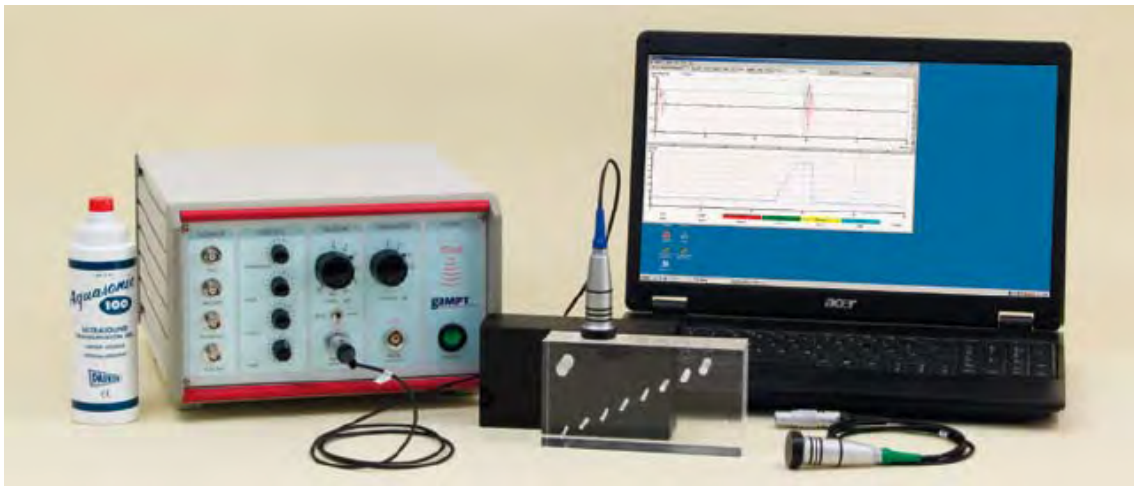


Figura 38 Componentes del experimento PHY06.

- **Propósito:**

Se examina el poder de resolución de dos defectos vecinos por medio de una sonda de 1MHz y otra de 4MHz. Por tanto, la relación entre la longitud de onda, la frecuencia, la longitud de pulso y el poder de resolución a quedan ilustrados a través de este método.

- **Setup:**

- Unidad de control GAMPT Scan.
- Sonda de 1 MHz.

- Sonda de 4 MHz.
- Bloque de pruebas transparente.

- **Bases:**

Las distancias más pequeñas entre dos puntos que puede detectar una sonda y que pueden ser parametrizadas, están denominadas como poder de resolución. Tanto la longitud de pulso como la resolución axial dependen estrechamente de la frecuencia de emisión. Con un incremento de la frecuencia, la longitud de pulso se vuelve más corta, por lo que la resolución axial aumenta. Por otro lado, con este incremento de frecuencia, la profundidad de penetración decrece.

- **Procedimiento:**

Lo primero de todo, humedecer la sonda mediante el líquido de ultrasonidos. Posteriormente se ajustan el transmisor y el receptor y el TGC con una señal adecuada. Gracias a las líneas de la gráfica podemos medir la longitud del eco y la distancia para un rango de tiempo determinado. Se recomienda usar el zoom para la sonda de 4 MHz.

- **Resultados:**

Los resultados no son posibles de obtener debido a la falta del equipo necesario para la elaboración de dicho experimento.

4.4.2. IND01 Prueba No Destructivos (END)

Con el fin de localizar y determinar el tamaño de las discontinuidades de acuerdo con el método de pulso-eco, el dispositivo está calibrado para una sonda ultrasónica normal. Para ello, se compila un diagrama DGS y se establece una línea horizontal de evaluación en el diagrama para una serie de defectos del mismo tamaño y de diferentes profundidades, utilizando el diagrama de tiempo de control de ganancia (TGC).

La localización de discontinuidades se realiza aquí por la reflexión de la onda de sonido, con el tiempo de vuelo, que actúa como una medida de la profundidad de la discontinuidad.

En cambio, una determinación exacta de tamaño es por lo general problemático debido a la atenuación de material y las características del campo de sonido. El tamaño de las discontinuidades de gran extensión puede ser determinada por la digitalización y el tamaño de las pequeñas discontinuidades se determina por comparación idealizada de un diagrama DGS.

En la Figura 39 se pueden observar los diferentes componentes del experimento.

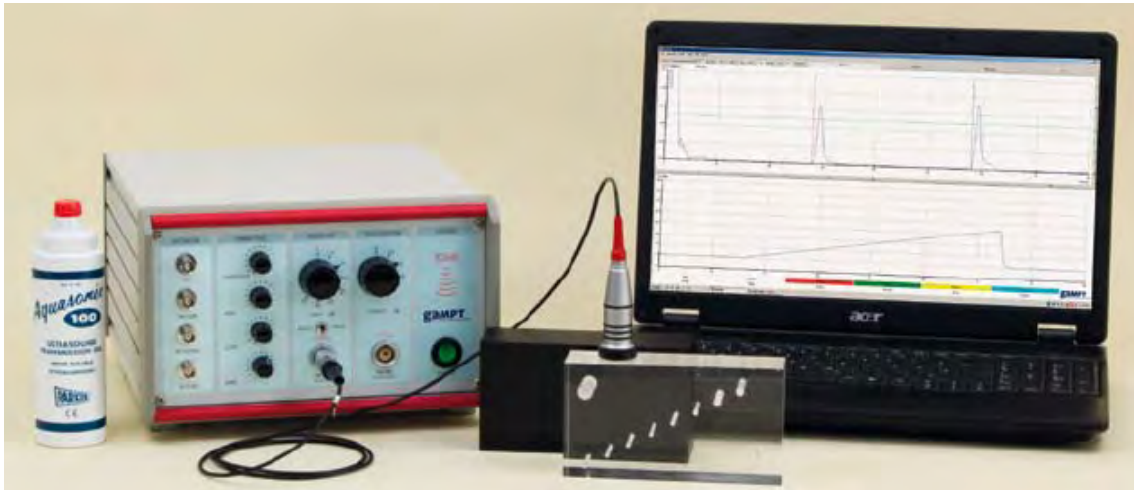


Figura 39 Componentes del experimento IND01

- **Propósito:**

Para una sonda normal, se lleva a cabo un ajuste del dispositivo para la localización de un defecto. El tamaño de la discontinuidad se calcula desplazando el cabezal de prueba y utilizando el diagrama de DGS. Este diagrama debe ser examinado y evaluado para su interpretación.

- **Setup:**

- Unidad de control GAMPT-Scan.
- Sonda de 2 MHz.
- Bloque transparente de pruebas.

- **Bases:**

En los ensayos END se utilizan unos cabezales de sondas distintos para diferentes tareas. Para el método pulso-eco, el cual se corresponde con el que vamos a realizar, se usan transductores normales. Las discontinuidades del bloque de pruebas se localizan mediante la reflexión de la onda de sonido emitida por la sonda. El tiempo de vuelo es medido para la profundidad del defecto y depende de la respectiva velocidad de la onda en el material.

- **Procedimiento:**

Para calcular la velocidad del sonido del material se debe utilizar el eco de fondo adecuado y una configuración de la pantalla del GAMPT-Scan de tal forma que la profundidad sea directamente legible.

Se puede calcular la posición de las discontinuidades a través de la siguiente fórmula:

$$S = \frac{c * t}{2}$$

Donde S es la distancia a la que se encuentra la discontinuidad, t el tiempo de vuelo de la onda, el cual se va mostrar por pantalla en el programa, y c la velocidad de la onda en el material correspondiente.

En primer lugar se calcula la velocidad del ultrasonido en el material y una vez hallada se procede a determinar las profundidades de cada defecto.

- **Resultados:**

Para calcular la velocidad del sonido se fija en cualquier gráfica de este bloque para determinarla:

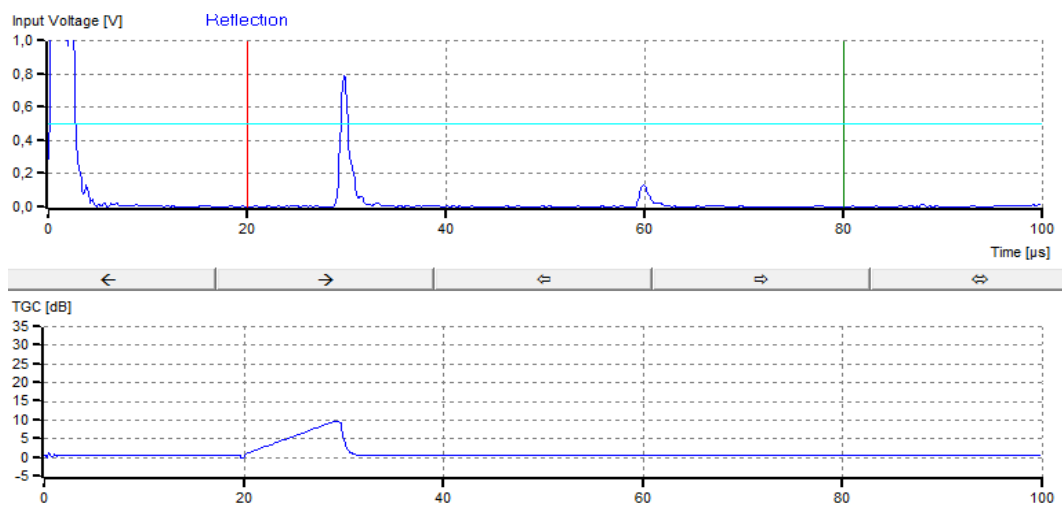


Figura 40 Imagen del ensayo IND01.

En la Figura 40 se puede observar como en 60 µs, que es el tiempo de vuelo de la onda, se produce un pico en el diagrama, el cual indica la profundidad del borde inferior (altura del bloque). Por otro lado, se sabe que la altura del bloque es de 80.7 mm, por lo que ya se tienen todos los datos para conocer la velocidad del sonido.

$$c=2690 \text{ m/s}$$

Con este dato se pueden calcular todas las profundidades de las discontinuidades en la pieza, las cuales las se muestran en la siguiente Tabla 1:

Tabla 1: Valores de las profundidades de los defectos.

	t (μs)	c (m/s)	S (mm)
defecto1	7	2960	10,36
defecto2	11	2960	16,28
defecto3	18	2960	26,64
defecto4	23	2960	34,04
defecto5	30	2960	44,4
defecto6	34	2960	50,32
defecto7	40	2960	59,2
defecto8	47	2960	69,56

Los defectos están numerados según se puede observar en la Figura 41:

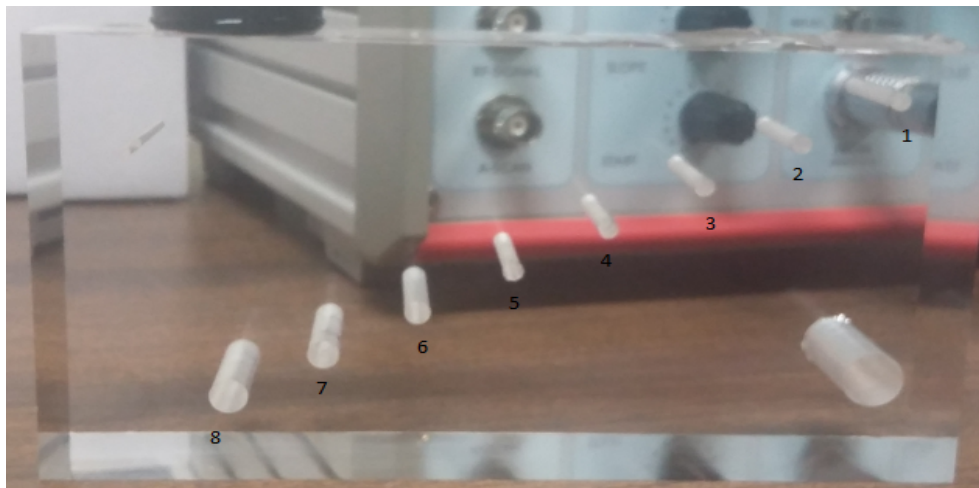


Figura 41 Distribución de defectos en el bloque de pruebas.

El valor de las profundidades es orientativo ya que en primer lugar, el equipo no está calibrado y en segundo lugar, a la hora de calcular el tiempo de vuelo en cada discontinuidad se ha podido cometer un error de interpretación ya que hay que realizarlo sobre el diagrama.

4.4.3. IND03 Medición de Nivel

En el experimento, se construye una medición de nivel ultrasónico para un depósito de líquido de cualquier forma deseada. Se registra una calibración curva para los volúmenes de llenado y se comprobará sobre la base de un llenado del tanque definido.

Se pueden utilizar en casi cualquier medio, incluidos los casos en los que los materiales están distribuidos en capas, donde hay formación de espuma e incluso en líquidos muy agresivos, ya que la medición puede llevarse a cabo desde el exterior a través de la pared del recipiente, como se puede ver en la Figura 42.



Figura 42 Componentes del experimento IND03

- **Propósito:**

El objetivo de este experimento es la obtención de una curva de calibración de un líquido arbitrario contenido en un recipiente de pared dura.

- **Setup:**

- Unidad de control GAMPT-Scan.
- Sonda de 2 MHz.
- Recipiente de cristal.

- **Bases:**

La medición del nivel en un líquido juega un papel importante en multitud de procesos industriales, como por ejemplo en reactores, tanques de reserva, estaciones de llenado, etc.

Los aparatos ultrasónicos para la medición de llenado son los más adecuados para el control del estado de los líquidos y son aplicables a multitud de medios como los espumosos o los líquidos agresivos. Para ello se utiliza un rango muy amplio de frecuencias, cada una de ellas adecuada para un medio, y que pueden ir desde 40 KHz hasta 5 MHz.

Para medir el volumen de un líquido en un recipiente se realiza el ensayo a través de la parte posterior y el tiempo de vuelo hasta el reflejo en la superficie del líquido, es el valor determinado.

- **Procedimiento:**

Primeramente se debe fijar correctamente el recipiente a una estructura que lo mantenga estable y en una posición que permita operar de forma cómoda con la sonda sobre el recipiente.

Después de rellenar el recipiente con un líquido determinado se debe ajustar la onda que transmite la sonda, por medio de la potencia de recepción, de transmisión y el TGC. Una vez haya hecho esto se podrá determinar el tiempo de vuelo.

Con la curva de calibración obtenida se calcula el nivel de llenado de multitud de volúmenes.

- **Resultados:**

En este ensayo tampoco se pueden obtener los resultados debido a la falta del equipo necesario y además no es uno de los experimentos de los que luego se tiene que extraer el guión de la práctica requerido, que es realmente el objetivo de este proyecto.

4.4.4. IND06 Pruebas de haz de ángulo

El experimento demuestra el uso de sondas ultrasónicas de haz angular para la localización de discontinuidades. Las mediciones son a partir de líneas de retardo (o cuña de haz de ángulo) con distintos ángulos de incidencia para la localización de discontinuidades en el bloque de pruebas de aluminio.

Para este experimento se utiliza una cuña de 38° y un bloque de pruebas de aluminio, en una disposición de medición como queda explicada esquemáticamente en la Figura 43.

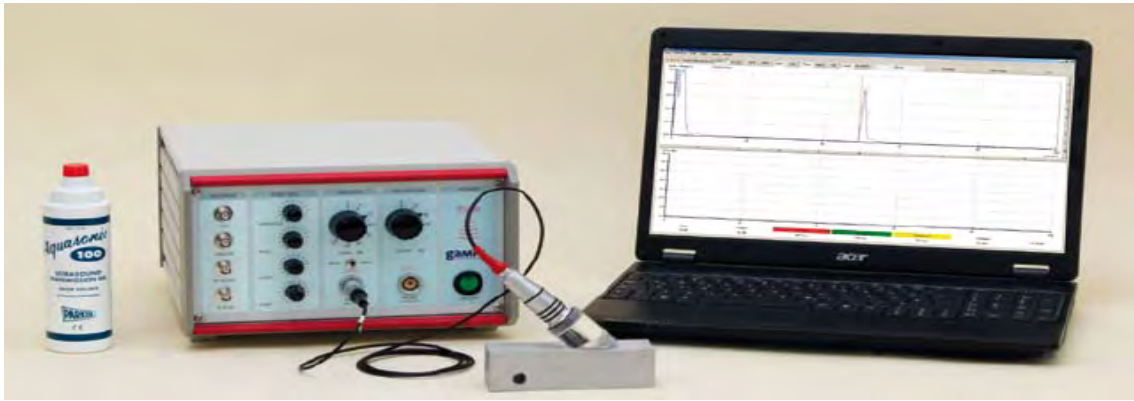


Figura 43 Componentes del experimento IND06

- **Propósito:**

Para la medición de discontinuidades en el aluminio vamos a requerir del uso de unas cuñas de haz de ángulo. Se puede calcular multitud de parámetros a través de este experimento como son la longitud de la línea de retardo o cuña, la velocidad del sonido de la onda transversal, el ángulo de incidencia de la sonda y el ángulo del punto de salida de la línea de retardo.

En este experimento se desarrolla la forma con la que se calcula el tiempo de vuelo en la cuña de haz de ángulo, es decir el tiempo que tarda la onda en recorrer el aplique angular. Este parámetro sirve para posteriormente hallar todos los demás parámetros arriba citados, aunque no se calculan numéricamente debido a que no son tan trascendentales como conocer la mecánica del experimento.

- **Setup:**

- Unidad de control GAMPT-Scan.
- Sonda de 2 MHz.
- Cuña de línea de retardo de 38 grados.
- Bloque de pruebas de aluminio.

- **Bases:**

Las discontinuidades, a menudo, no van paralelas a la superficie del objeto de prueba, por lo que es práctico o incluso necesario pasar ondas de sonido a través de un ángulo específico, es decir, sondas de haz angular. Mientras que para la medición de la profundidad de ondas normales solo se requiere el tiempo de vuelo y la velocidad del sonido, en el caso de las sondas de haz de ángulo existen otros factores geométricos, tales como el ángulo de incidencia, la longitud de la línea de retardo, el punto de salida de sonido.

- **Procedimiento:**

Primeramente se debe encajar la sonda a la cuña por medio del gel ultrasónico para favorecer la transmisión. Se debe mover el conjunto acoplado a lo largo de la superficie del bloque de aluminio.

Para este experimento se debe contar con un bloque de calibración IIW como el visto en la Figura 44 si se quiere obtener un resultado preciso en las mediciones.

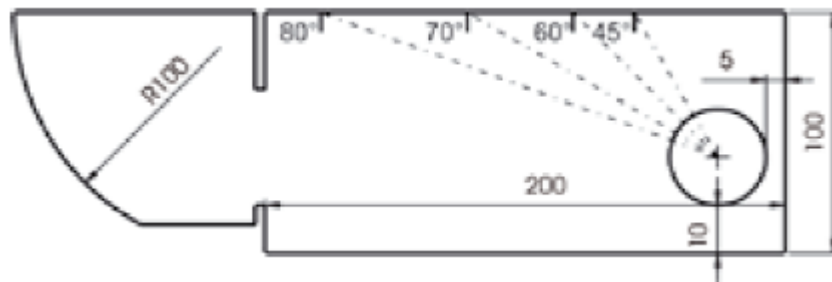


Figura 44 Bloque de calibración IIW

- **Resultados:**

Para la obtención de los resultados se utilizan una serie de fórmulas, que junto a los parámetros presentes en la Figura 45, donde se muestran dos posiciones del acoplamiento sonda-cuña, se puede llegar a la obtención del tiempo de vuelo en la cuña de haz de ángulo (t_v), que a su vez sirve para calcular, por ejemplo, la profundidad del defecto (T).

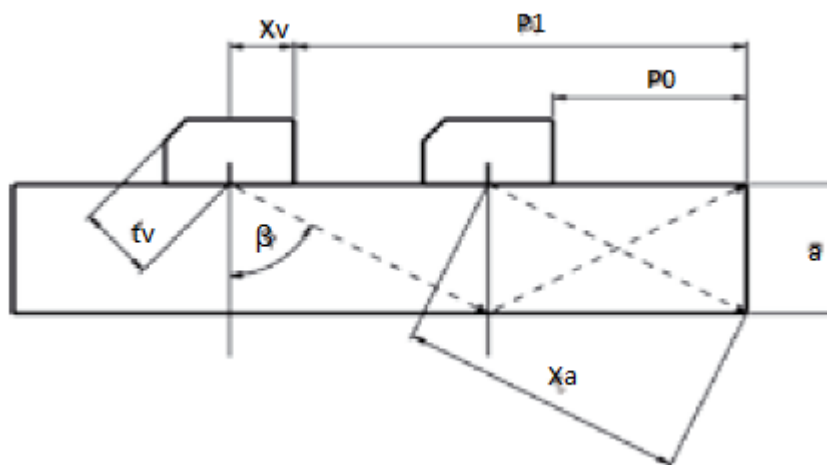


Figura 45 Parámetros del bloque IND06.

Las fórmulas para hallar los resultados son las siguientes:

$$X_a = a^2 + (P_1 - P_0)^2$$

Donde X_a es la distancia que recorre la onda en diagonal hasta un vértice o hasta un plano en el que rebote dicha onda del sonido y vuelva al mismo punto sin rebotar varias veces por todo el material.

Para calcular la velocidad del sonido en el material se usa la siguiente fórmula:

$$c = \frac{2X_a}{t_1 - t_0}$$

Donde t_1 es el tiempo que tarda en recorrer la onda cuatro distancias diagonales desde la posición izquierda de la Figura 45 (dos de ida desde el transductor con la cuña hasta el vértice superior derecho del bloque y dos de vuelta siguiendo el mismo camino) y t_0 es el tiempo de recorrido (multiplicado por dos) desde la posición derecha de la Figura 45 hasta el vértice inferior derecho.

Estos tiempos se pueden hallar gracias a la medición por parte del equipo Gampt-Scan de tal forma que en el diagrama se llegue a las dos posiciones en el bloque indicadas en la Figura 45, que salen representadas en dicho diagrama de forma que aparezca en un pico diferenciado de los demás.

Con el valor de la velocidad del sonido c , se puede conocer el tiempo de vuelo t_v , que es el valor al que se quiere llegar en este experimento como puente para hallar el resto de parámetros.

$$t_v = t_1 - 2 \frac{X_a}{c}$$

Finalmente se puede llegar a conocer el valor de la distancia teórica T a la que se encuentra la discontinuidad por medio de la siguiente fórmula:

$$T = \frac{c(t - t_v)}{2 * \cos \beta}$$

Donde el valor de β se halla a través de la siguiente expresión:

$$\tan \beta = \frac{P_1 - P_2}{a}$$

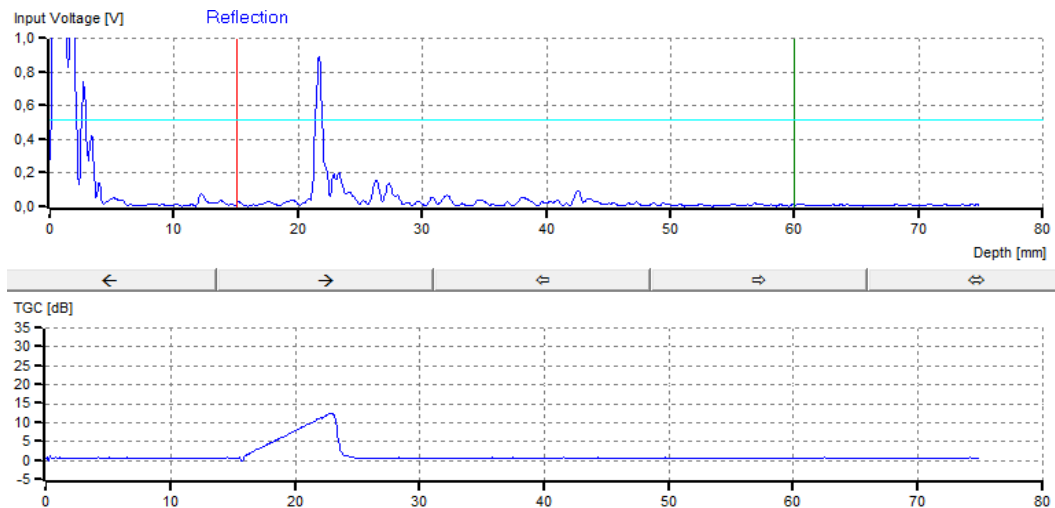


Figura 46 Diagrama del experimento IND06.

Y donde t es el valor representado en la Figura 46 y que representa el tiempo de vuelo de la posición de la discontinuidad.

Finalmente, introduciendo todos los valores se llega a un valor de $T = 19,12$ mm.

En las siguientes versiones de la práctica propuesta se propondrá a los alumnos el cálculo de la velocidad del sonido en este material y del tiempo de retardo producido por el supletorio angular utilizado. En esta misma probeta se podrá medir la posición del defecto.

4.4.5. IND07 Determinación de la profundidad de Grieta (TOFD)

La determinación de la profundidad de la grieta se lleva a cabo sobre un bloque de ensayo de aluminio con grietas definidas, como el que se puede visualizar en la Figura 47. Existen dos métodos para evaluar las características del bloque, el método TOFD y el método de amplitud del eco. En este caso se estudia el segundo debido a que es con el que se pueden llegar a estudiar todas las grietas presentes en el bloque a inspeccionar, ya que con el método TOFD, las discontinuidades más pequeñas no pueden llegar a conocerse.

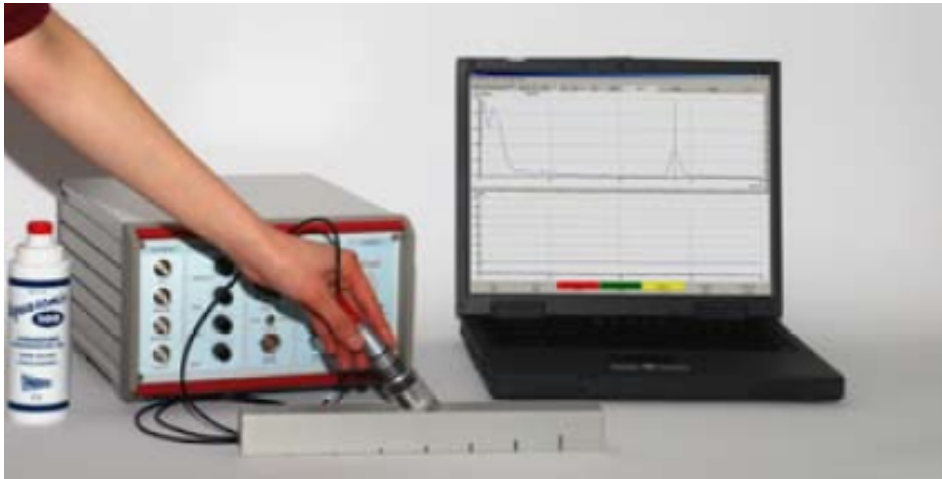


Figura 47 Componentes del experimento IND07

- **Propósito:**

El propósito de este experimento es investigar las características de las grietas presentes en un bloque de ensayos de aluminio mediante el uso de sondas con un determinado ángulo.

Para este experimento se halla de nuevo el valor del tiempo de vuelo de la cuña de haz de ángulo de la misma forma que en el anterior experimento ya que hay compatibilidad de medidas entre los dos bloques y posteriormente se desarrolla la forma para hallar los parámetros propios de este bloque.

- **Setup:**

- Unidad de control GAMPT-Scan.
- 2 sondas de 2MHz.
- Bloque de pruebas de aluminio.
- Cuña de 38 grados.
- Transceptor línea de retardo (TOFD)

- **Bases:**

Como ya se ha introducido antes, por medio de este experimento se lleva a cabo un estudio de diversos parámetros de la geometría de los defectos presentes, como son la longitud y la profundidad. Para ello se utiliza el transductor de haz de ángulo, que genera el denominado efecto de esquina (método de la amplitud del eco), que es un eco generado entre la grieta y la superficie. Este eco es más grande cuanto más profunda se encuentra dicha grieta.

- **Procedimiento:**

Para este experimento se utiliza tanto el transceptor de línea de retardo como la cuña de haz de ángulo (aunque en este manual solo se usará la cuña de haz de ángulo) que van acoplados a la o las sondas y el conjunto es desplazado a lo largo de la longitud del bloque de pruebas. Se mide el tiempo de vuelo y la amplitud y dadas las características del material se pueden conocer el tamaño y la profundidad de las grietas.

Antes de entrar con los parámetros propios del bloque de pruebas de este experimento se calcula el tiempo de vuelo que emplea la onda en atravesar la cuña de haz de ángulo. El método para calcularlo es exactamente el mismo que en el experimento IND06, por lo que el valor debe ser igual que el de dicho experimento.

Una vez calculado el tiempo de vuelo en la cuña angular t_v se procede a desarrollar el método de cálculo de las medidas del bloque y sus discontinuidades. Para ello se utilizan los parámetros presentes en la Figura 48:

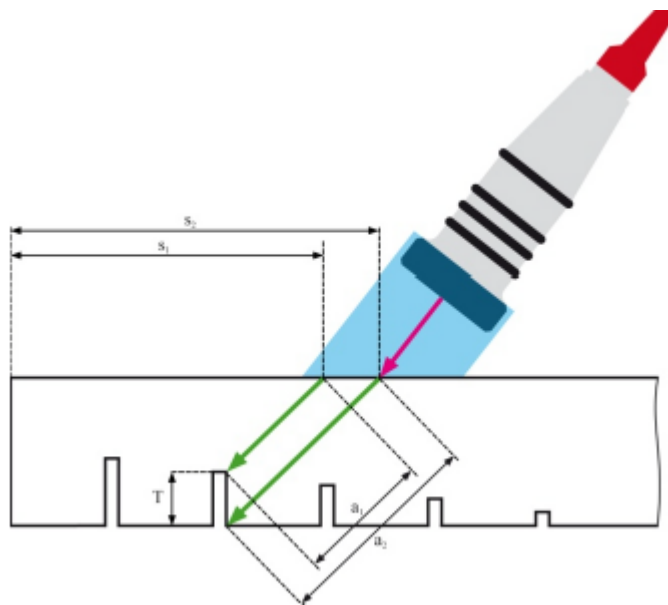


Figura 48 Medidas del bloque IND07

- **Resultados:**

El valor que se desea calcular de la grieta que se estudia es la altura de la misma, representada por T y cuya fórmula es la siguiente:

$$T = \sqrt{(\Delta a)^2 - (\Delta s)^2} = \sqrt{\left(\frac{c_T^2 (t_2 - t_1)^2}{4}\right) - (s_2 - s_1)^2}$$

Donde c_t es la velocidad del sonido en el material y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$c_t = \frac{2\sqrt{d^2 + (s_2 - s_1)^2}}{(t_2 - t_1)}$$

Donde a su vez, d es el espesor o altura del bloque de aluminio.

Por otro lado, t_1 y t_2 son las expresiones de los tiempos de vuelo en el material. t_1 Es el tiempo que tarda la onda en llegar al vértice del defecto y volver y t_2 es el tiempo que tarda en llegar a la base del defecto y volver. Estos valores se pueden hallar mediante la inspección directa mediante el Gampt-Scan, como se puede ver en la Figura 49.

Los valores de s_1 y s_2 son los representados en la Figura 48 y dependen de la posición en la que se encuentre el acoplamiento cuña-sonda en la longitud del bloque.

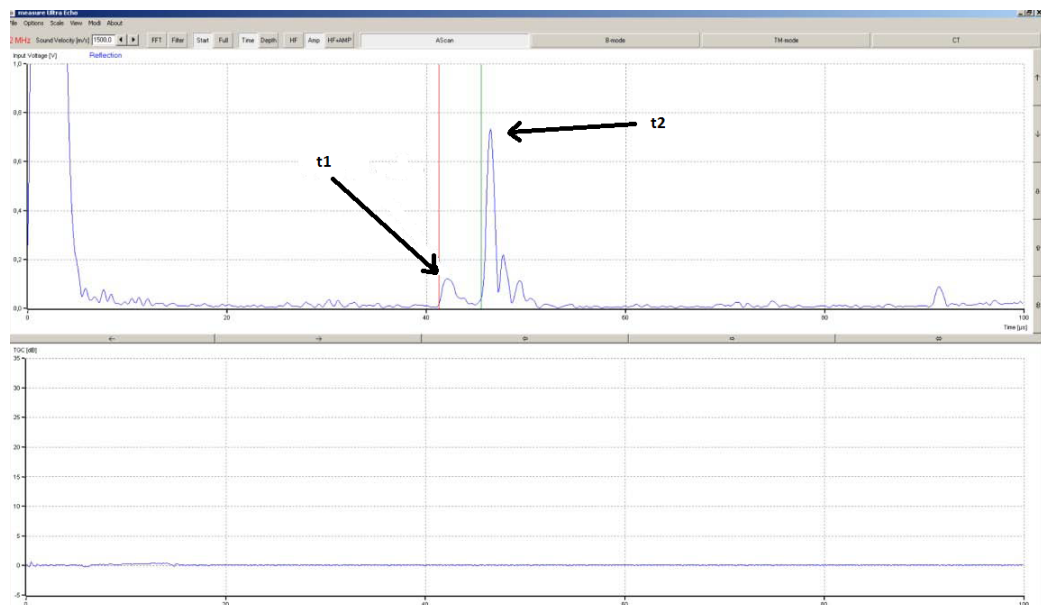


Figura 49 Diagrama del experimento IND07

4.4.6. PHY04 Atenuación acústica en líquidos

En este experimento se investiga la atenuación de las ondas de sonido en diferentes líquidos. Para cada uno de los líquidos, el coeficiente de atenuación acústica es determinado mediante regresión lineal.

Los componentes que se necesitan para desarrollar este experimento se pueden ver en la Figura 50.

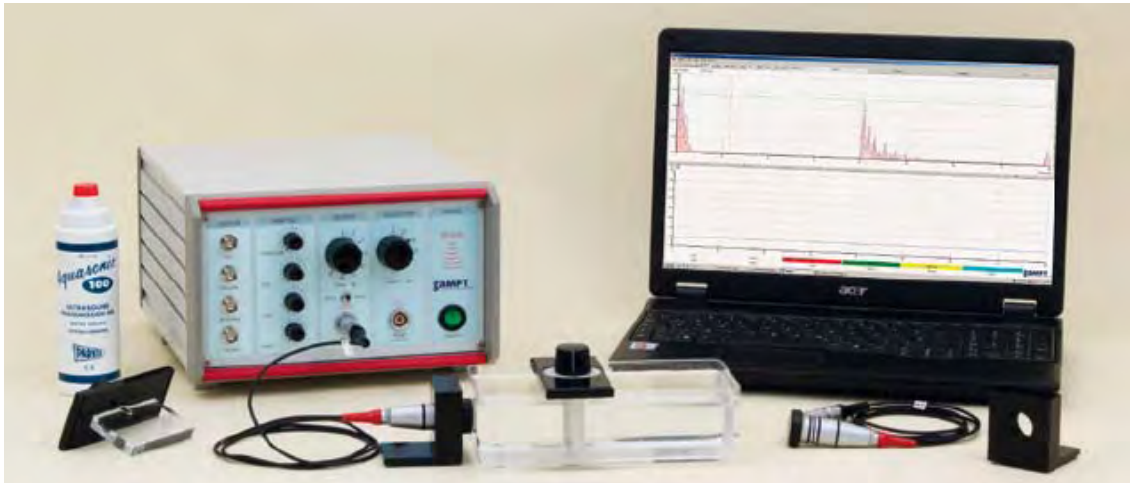


Figura 50 Componentes del experimento PHY04

- **Propósito:**

La atenuación en diferentes líquidos es medida dependiendo del espesor de capa y se muestra en pantalla gráficamente. Los coeficientes de atenuación se calculan mediante regresión lineal y las leyes de atenuación de cada material particular.

- **Setup:**

- Unidad de control GAMPT-Scan.
- 2 sondas ultrasónicas de 2 MHz.
- Shear wave set.

- **Bases:**

Durante el paso de las ondas de sonido a través de un líquido, estas sufren una atenuación que a su vez provoca una pérdida de energía en forma de absorción, reflexión y dispersión. También afecta la geometría del conjunto.

En algunos líquidos la reflexión y la dispersión pueden ser obviadas debido a sus propiedades. Por otro lado las características geométricas pueden ser estimadas en comparación con las del agua. Las leyes de atenuación siguen la siguiente fórmula:

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

En líquidos, las amplitudes de las señales reflejadas para diferentes distancias se determinan por medio de un reflector móvil. El coeficiente de atenuación α es calculado para dos espesores de capa x_1 y x_2 :

$$\alpha = \frac{1}{(x_1 - x_2)} \cdot \text{Ln} \frac{A_2}{A_1}$$

- **Procedimiento:**

Primeramente se calcula la velocidad en el líquido del sonido en transmisión. Para la muestra, primero se transmite en la dirección longitudinal y posteriormente en la perpendicular y se calcula tanto el tiempo de vuelo como la distancia de los transductores. Con estos valores se establece un ratio de las diferencias de velocidades. Los valores son incorporados al programa y el espesor de capa puede ser determinado directamente por los valores del tiempo de vuelo.

- **Resultados:**

Los resultados no se pueden obtener debido a la falta de los componentes necesarios para la consecución del experimento.

4.4.7. IND08 Detección de discontinuidades

En este experimento se estudia el uso de un bloque de prueba con diferentes tipos de discontinuidades. También se puede llegar a conocer la aplicabilidad y el rendimiento de diferentes técnicas de detección de dichas discontinuidades.

Basándose en los resultados, se evalúa la detectabilidad de los distintos tipos de localización de defectos.

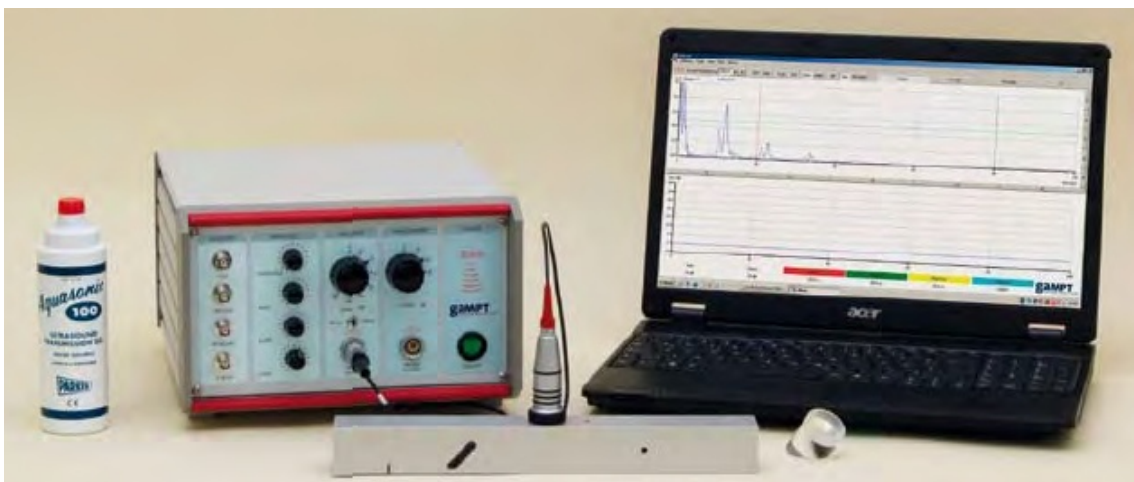


Figura 51 Componentes del experimento IND08

- **Procedimiento:**

En una muestra con distintos tipos de discontinuidades se llevan a cabo distintas técnicas de detección de estas, primeramente con un escaneo de la muestra y posteriormente se examina cada señal de discontinuidad con el haz de ángulo y con la probeta de forma normal. Los resultados son examinados proporcionando información.

- **Setup:**

-Unidad de control GAMPT-Scan.

-Sonda de 2 MHz.

-Haz de ángulo de 38 grados.

-Bloque de aluminio de diferentes tipos de discontinuidades.

- **Bases:**

Los métodos no destructivos de sondeo por ultrasonidos requieren información acerca de la geometría del objeto y de las posiciones de las discontinuidades para así optimizar el sondeo mediante los transductores.

- **Procedimiento:**

Para este experimento se utiliza el acoplamiento formado por la sonda de 2 MHz y la cuña de haz de ángulo. Se ajusta la potencia de transmisión y recepción de tal manera que ninguna señal esté sobredimensionada. Posteriormente se hacen pasadas a lo largo del material utilizando el gel ultrasónico para facilitar la transmisión. Por último aparecen imágenes en pantalla que dan información acerca de las características de los defectos presentes en el material.

- **Resultados:**

Los resultados varían en función del tipo de discontinuidad que se explore dentro del bloque.

En este caso la discontinuidad oblicua sirve para ilustrar la mecánica del experimento completo y se pueden establecer dos posiciones para comprobar la diferencia de profundidad del defecto, aunque no se puede llegar a un valor numérico debido a la falta de calibración del equipo.

La primera posición (la más profunda) se puede visualizar en la Figura 52, mientras que la posición segunda (la menos profunda) se puede observar en la Figura 53.

Haciendo la comparación de las dos figuras, se puede apreciar claramente como se produce un cambio sustancial en la profundidad del defecto según se desplaza la sonda a través del bloque.

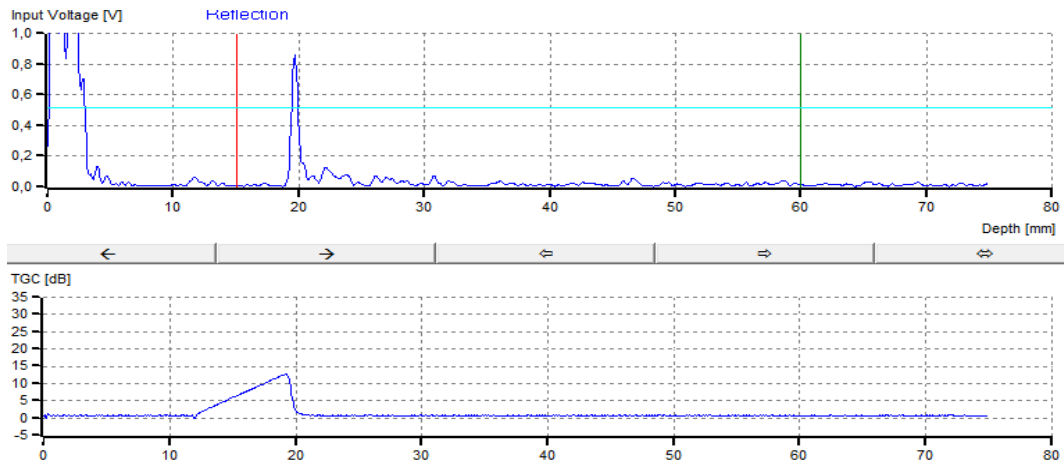


Figura 52 Diagrama posición 1 defecto oblicuo.

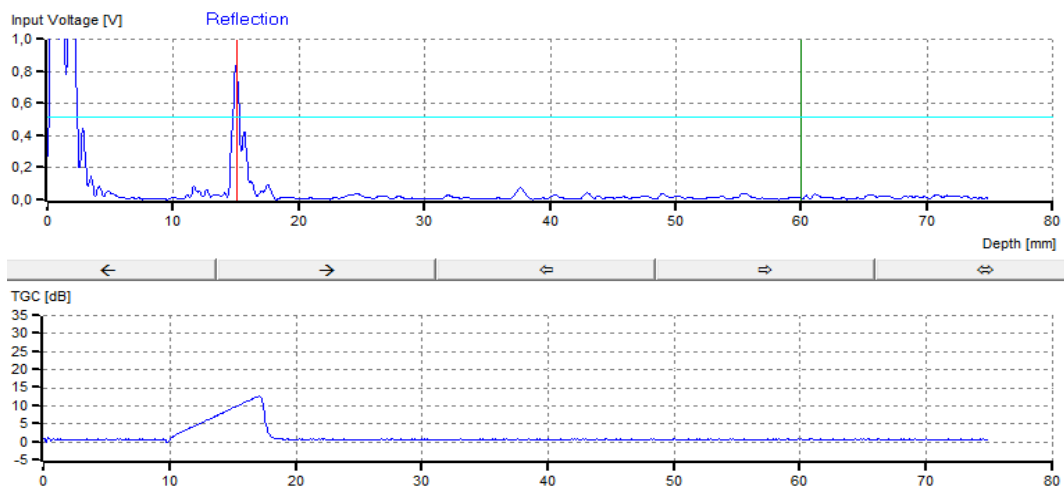


Figura 53 Diagrama posición 2 defecto oblicuo.

5. GUIÓN DE LA PRÁCTICA

A continuación se presenta el guión de la práctica que va a formar parte de una sesión de laboratorio de la asignatura de tecnología de Materiales del Grado de Tecnologías Industriales de la Universidad Carlos III de Madrid.

El objetivo primario de este guión es la introducción a los alumnos, en los ensayos de ultrasonidos, por lo que a la hora de confeccionarse dicho guión se ha buscado un enfoque cualitativo que permita al alumno una toma de contacto con este tipo de ensayos, por lo que

en ningún caso se pretende que lleguen a unos resultados precisos en sus mediciones, sino que comprendan únicamente la mecánica de los ensayos.

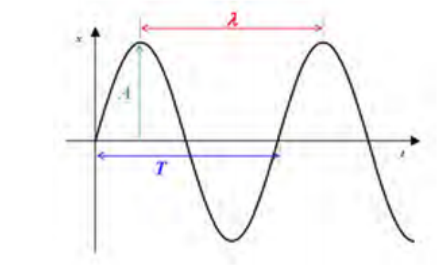
PRÁCTICA DE ULTRASONIDOS

Introducción a los ultrasonidos:

Las ondas ultrasónicas no pueden propagarse en el vacío, únicamente lo hacen a través de medios materiales que contengan átomos o moléculas que puedan vibrar. Las ondas, al viajar por los distintos materiales, se atenúan debido a las características del medio y a los fenómenos de refracción y reflexión, por lo que no todos los medios serán apropiados para la transmisión de ultrasonidos.

Parámetros de los ultrasonidos.

Los parámetros que caracterizan las ondas ultrasónicas son las mismas que para las ondas sónicas y se enumeran a continuación.



- Periodo (T): Tiempo empleado en realizar una oscilación completa.
- Longitud de onda (λ): Corresponde a la distancia entre dos planos en los que las partículas poseen el mismo estado de movimiento. Está relacionada la frecuencia siendo inversamente proporcional a la misma.

Se mide en metros. Para cualquier onda se verifica, siendo c la velocidad del sonido en el medio.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

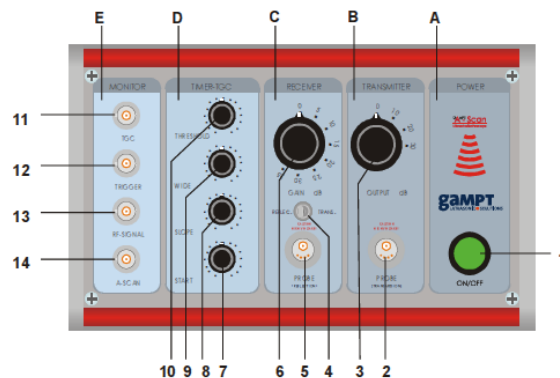
- Amplitud máxima de oscilación (A): Es el máximo desplazamiento que realiza una partícula desde la posición cero o de equilibrio.
- Frecuencia de la onda (f): Corresponde al número de oscilaciones de una partícula por segundo.

$$f = \frac{1}{T}$$

- Velocidad acústica: Corresponde a la velocidad de propagación del sonido en un material, es decir, la distancia recorrida por las ondas en el material por unidad de tiempo.

Unidad de control:

A continuación se presenta de forma esquematizada las funciones que permiten desarrollar el funcionamiento la unidad de control GAMPT-Scan:



A Power (fuente de alimentación)

1. on/off

B Transmitter (transmisor)

7. Conector sonda de transmisión

8. Potencia emitida

C Receiver (receptor)

9. Interruptor reflexión/transmisión

10. sonda de modo conector reflexión o el receptor en el modo de transmisión
11. amplificador receptor

D Time Gain Control (TGC) (tiempo control de ganancia)

7. start (punto de comienzo)
8. slope (alto)
9. width (ancho)
10. threshold (límite)

E Monitor (salidas osciloscopio)

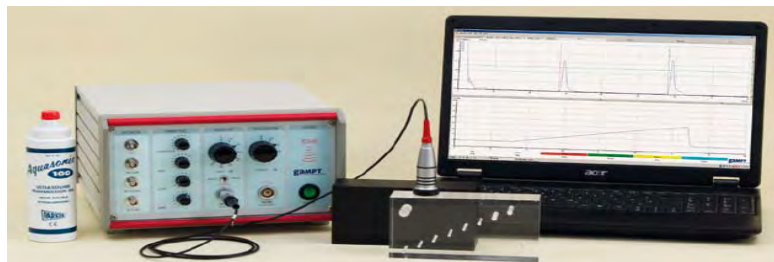
11. señal TGC
12. señal trigger
13. señal AScan HF
14. señal AScan NF

Una vez presentadas las funciones disponibles en la unidad de control GAMPT, se procede a desarrollar y explicar una serie de experimentos que son los que se pongan en prácticas en las sesiones de laboratorio de la asignatura.

Hay que dejar claro que estas mediciones no son del todo precisas ya que no se puede llegar a unos datos cuantificables y fiables, debido a que los resultados cambian constantemente de una medición a otra, por una falta de calibración, por lo que adquieren la calidad de orientativos.

Experimentos:

Prueba No Destructivos(END)



- Equipo necesario:

- Unidad de control Gampt-Scan.
- Sonda de muestreo de 2 MHz.
- Bloque de pruebas transparente.

- Procedimiento:

Primeramente se aplica una capa de gel para facilitar la transmisión de los ultrasonidos del transductor al material.

Posteriormente se procede a realizar un sondeo del material mediante unas pasadas por la superficie del material de tal forma que se pueda ir viendo los distintos cambios que se producen en la gráfica.

Por último se realiza la interpretación de los datos que proporcione tal gráfica para conocer las características de las discontinuidades.

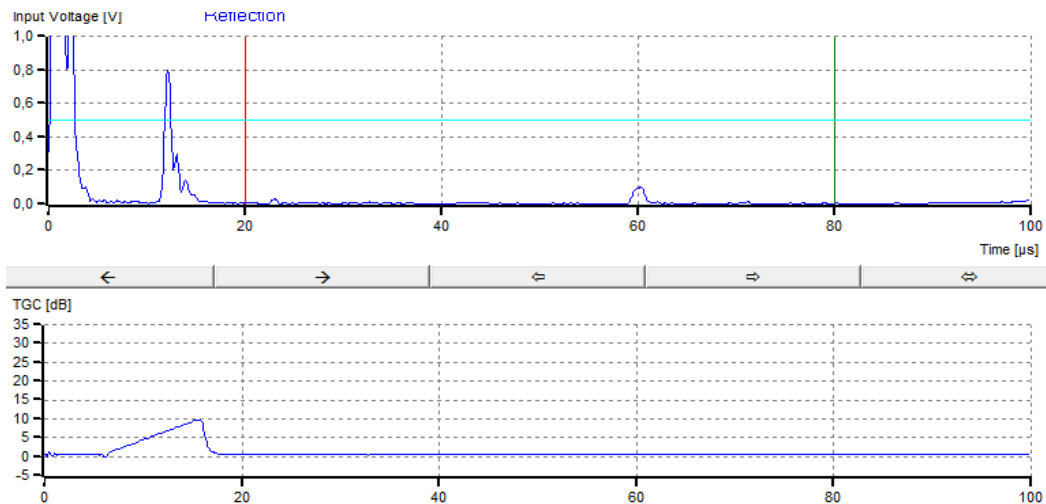
- Resultados:

A continuación se exponen los resultados obtenidos en la medición de algunas de las discontinuidades presentes en el bloque. Se ha realizado la medición de cuatro de ellas para así poder observar las diferencias entre estos defectos y sacar una serie de conclusiones.

La primera posición que estudia es la siguiente:



Y el resultado de su medición en el programa es el siguiente:



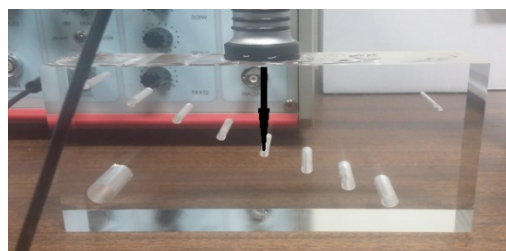
Como se observa, se ajusta el diagrama TGC mediante los ajustables del módulo TIMER-TGC para centrar la señal en la posición de la discontinuidad y así conseguir que sea más precisa.

En este caso se ha escogido la modalidad de TIME ya que es análoga a DEPTH y sus resultados son los mismos.

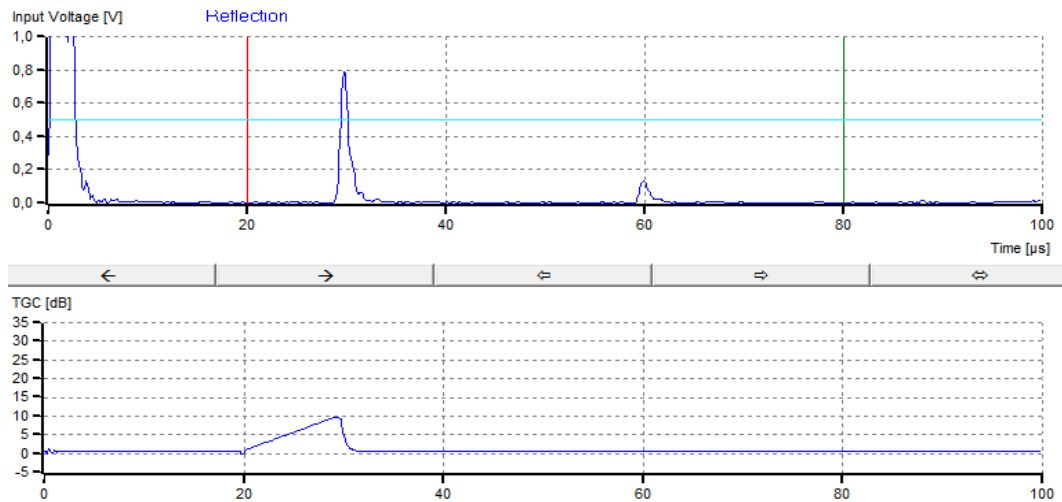
Se puede visualizar que la señal aumenta su amplitud en el espacio comprendido entre 10 y 20 μs y también en 60 μs . El primer pico se corresponde con la profundidad de la discontinuidad, mientras que el segundo, mucho menos pronunciado, da la señal de rebote en el fondo del bloque.

Por otro lado, el tamaño de la discontinuidad es muy difícil de conocer mediante este experimento debido a que los resultados obtenidos no son todo los precisos que deberían para conocer tal característica.

La siguiente posición se corresponde con la mostrada en la siguiente imagen:



Y su correspondiente gráfica es la siguiente:



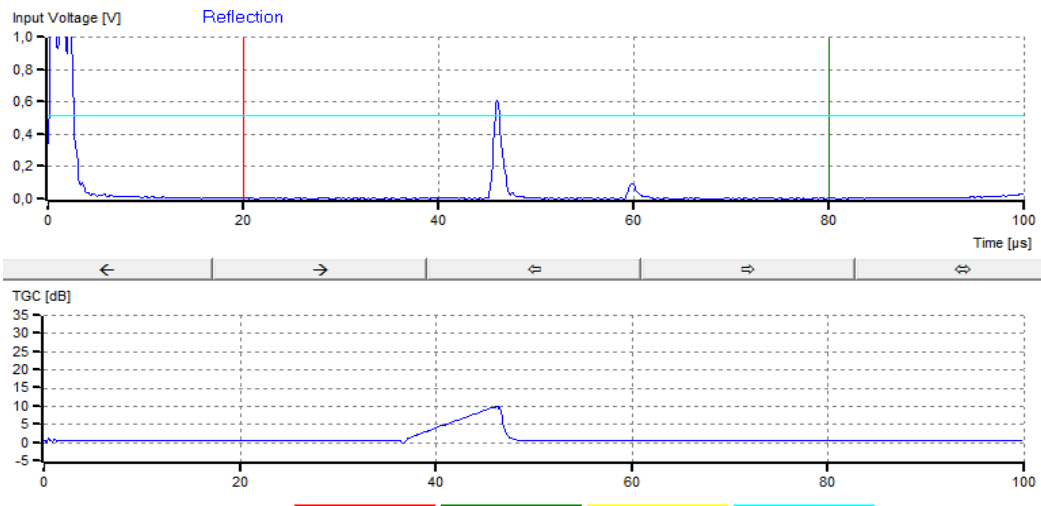
En esta ocasión también se ha ajustado el diagrama TGC en la posición que se muestra el principal pico para aumentar la precisión de la señal, que aparece entre las posiciones 20 y 40 μs . La señal de rebote aparece de nuevo en 60 μs .

La variación respecto al anterior sondeo se puede ver en la posición de la discontinuidad, que al variar la profundidad varía también en la posición del diagrama DGS.

La siguiente posición de estudio se corresponde con la siguiente:



Y su diagrama es el que se muestra a continuación:



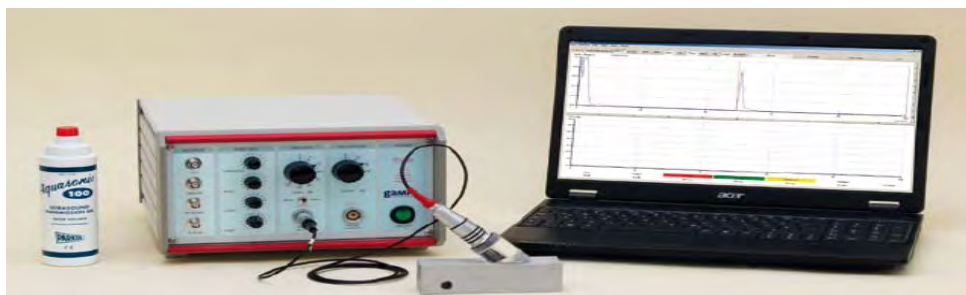
En este diagrama, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los casos anteriores, se puede observar como la discontinuidad se encuentra más profunda que las ya vistas. Por otro lado al aumentar dicha profundidad, se observa como disminuye también la amplitud de la señal. Esto es debido a la atenuación que experimenta la onda al pasar a través del material, por lo que cuanto más profundo este el defecto menor será la amplitud de su señal.

Como se ha podido ver en los anteriores diagramas, las unidades del eje horizontal vienen en μs , por lo que para conocer la profundidad del defecto en el material se utilizará la siguiente ecuación:

$$S = \frac{c * t}{2}$$

Donde c es la velocidad del sonido que viaja por el material, en este caso $c=2976 \text{ m/s}$.

Pruebas de haz de ángulo



- Equipo necesario

- Unidad de control Gampt-Scan.
- Sonda de muestreo de 2 MHz.
- Bloque de pruebas de aluminio.
- Cuña de haz de ángulo.

- Procedimiento:

Este experimento se realiza de forma muy similar al anterior con la particularidad de que hay que acoplar una cuña de haz de ángulo a la sonda para poder hacer el muestreo sobre el aluminio, lo que va a provocar que las pasadas se realicen de diferente forma que en el bloque transparente, donde había que posicionar la sonda directamente sobre la discontinuidad y en este caso hay que desplazar un poco dicha sonda.

- Resultados:

Los resultados de este experimento difieren del anterior debido a que cambia el material en el que trabajamos y por lo tanto cambian también las condiciones y las características generales del experimento.

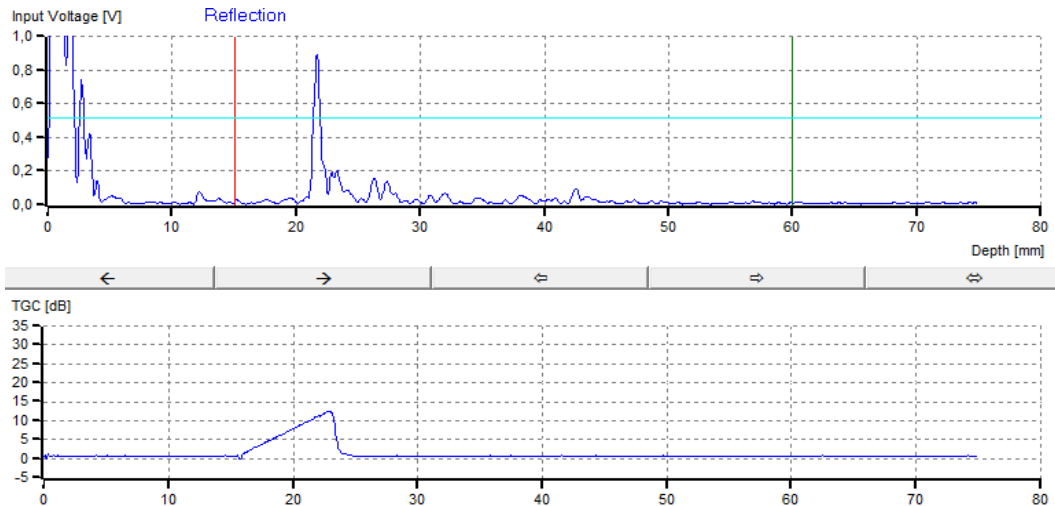
En este caso se realizan dos ensayos en diferentes posiciones para poder dar una imagen de la forma en la que se detectan las discontinuidades.

El primer ensayo se corresponde con la siguiente posición:



Como se puede observar, para detectar la discontinuidad hay que desplazar el conjunto de la sonda y la cuña para así compensar el ángulo de esta última y sea posible determinar donde se encuentra el defecto, debido a que si solo utilizamos la cuña, el diagrama se vuelve indescifrable por la multitud de interferencias que aparecen.

El diagrama de esta posición de muestra a continuación:

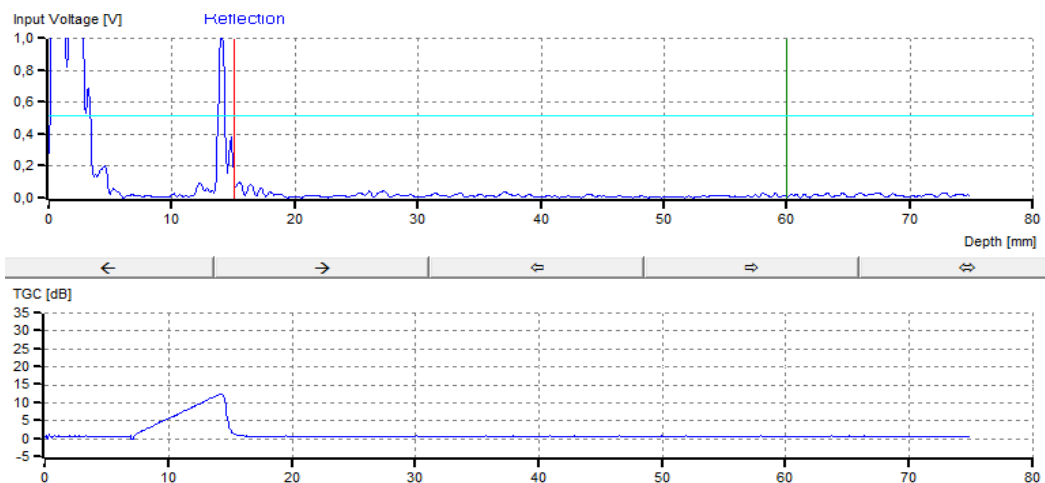


Para este experimento se ha optado por la función de DEPTH para así tantee también esta opción aunque tenga la misma función que TIME.

Se observa como aparece la discontinuidad entre 20 y 30 mm y esa es, teóricamente, la distancia a la que se encuentra la discontinuidad.

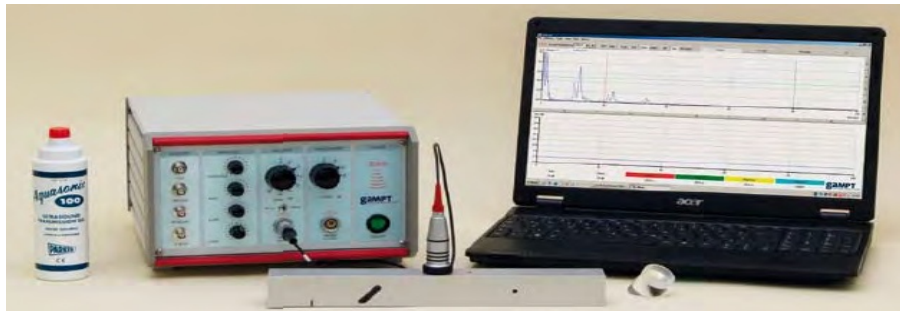
Por otro lado, como en el anterior caso, es muy difícil aproximar el tamaño del defecto a través de este diagrama debido a que sufre mucha variabilidad entre un ensayo y otro en el tamaño del mismo.

El segundo ensayo se realiza en la misma posición pero con el bloque dado la vuelta por lo que la profundidad se ve reducida considerablemente y por tanto el pico del diagrama debería estar desplazado a la izquierda (menos profundidad) y la amplitud debería incrementarse al haber menos atenuación acústica.



Efectivamente se cumplen las dos condiciones mencionadas anteriormente, el pico se desplaza a la izquierda al estar menos profundo el defecto, en este caso entre 10 y 20 mm, y la amplitud también aumenta por este motivo.

Detección de discontinuidades



- Equipo necesario:

- Unidad de control Gampt-Scan.
- Sonda de 2 MHz.
- Cuña de haz de ángulo.
- Bloque de pruebas de aluminio con distintos tipos de defectos.

- Procedimiento:

En primer lugar se realiza un acoplamiento entre el cabezal de la sonda y la cuña de haz de ángulo mediante la aplicación de gel ultrasónico. En segundo lugar se extiende una película de este gel por la superficie del bloque de aluminio y se procede a realizar lentas pasadas con el acoplamiento.

Los resultados que vayan apareciendo en pantalla deben ajustarse mediante el diagrama TGC para obtener una señal más precisa y finalmente se realiza la interpretación de los datos obtenidos.

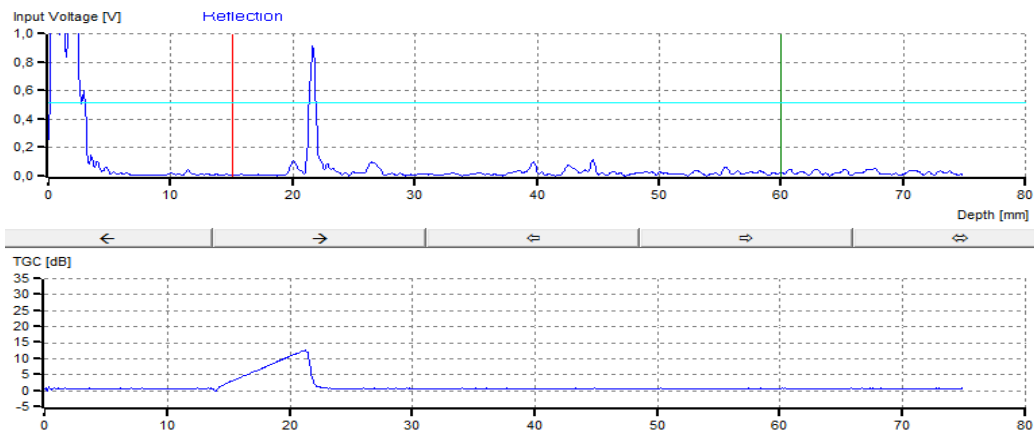
- Resultados:

A continuación se muestran los resultados que se han obtenido en el ensayo de varias posiciones del bloque.

La primera posición medida es la siguiente:



Como se ve, en esta primera posición se va mide una discontinuidad en forma de ranura y como en los anteriores experimentos en bloques de aluminio, se hace tal medición con el conjunto sonda-cuña un poco desplazado a la derecha. Los resultados son los siguientes:



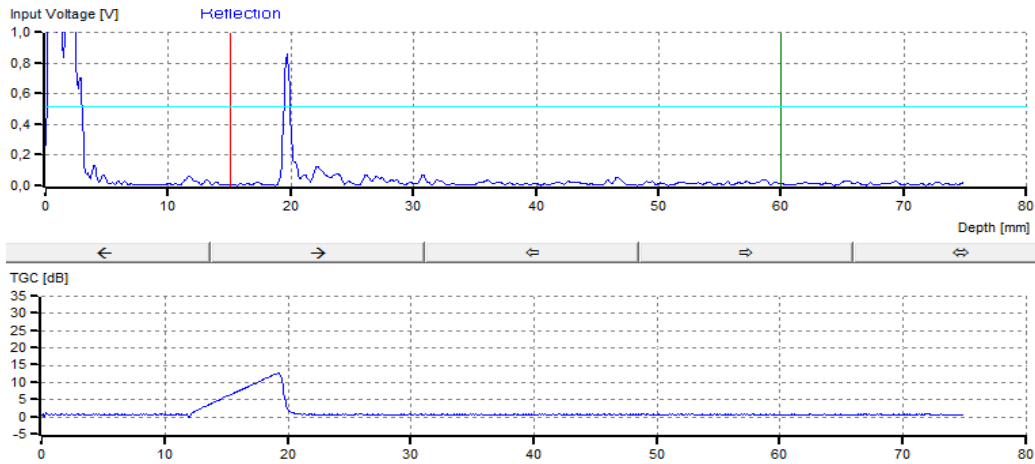
En este diagrama se puede visualizar la posición en la que se encuentra la discontinuidad tanto por la amplitud de la señal como el lugar donde aparece el pico de dicha señal.

El siguiente ensayo se lleva a cabo en la discontinuidad diagonal, por lo que al tratarse de un defecto continuado, se debe realizar dos ensayos para abarcar toda la discontinuidad.

En el primero, se estudia la parte más profunda del defecto, por lo que se sitúa el cabezal en la siguiente posición:

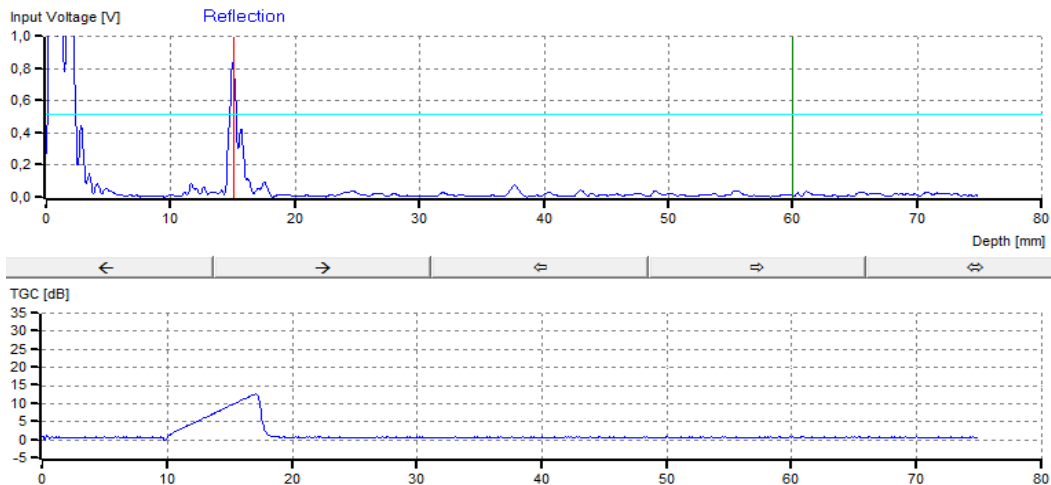


Y su correspondiente diagrama:



Para darle sentido a este diagrama se procede a realizar el segundo ensayo, que se centra en la parte menos profunda de la discontinuidad, por lo que se coloca la sonda en una posición más a la izquierda de la anterior.

El diagrama de este segundo ensayo es el siguiente:



Se puede ver claramente como el pico de la señal que nos muestra el lugar de la discontinuidad se encuentra más a la izquierda en el segundo ensayo debido a que en este caso, se encuentra a menos profundidad que el anterior.

Cuestiones:

- ¿Podría conocerse la posición de los defectos en el experimento 1? De ser así, indique la posición del defecto 1 y 3 según vienen expuestos.
- ¿Es posible conocer el valor exacto del tamaño de las discontinuidades? Razone su respuesta.
- En el experimento 1, ¿Qué información nos da el segundo pico que aparece en la señal?
- ¿Para qué sirven los ajustables del módulo TIMER-TGC de la unidad de control?
- ¿Es posible realizar el muestreo en aluminio sin utilizar la cuña de haz de ángulo? ¿Por qué?

6. CONCLUSIÓN

Se ha profundizado en los aspectos teóricos de los ultrasonidos, que aunque no se haya introducido ninguna información nueva acerca de estos, sirve de ayuda para comprender los capítulos posteriores del trabajo sobre todo pensando en los profesores que tienen que impartir esta práctica.

En segundo lugar, se ha elaborado un manual de uso del equipo de ultrasonidos del que trata el trabajo y se han realizado los experimentos que eran posibles desarrollar con el material del que se dispone. En este aparatado hay que destacar que se ha dado más importancia, tanto en el manual de uso, como en los respectivos ensayos, a los elementos que se pueden utilizar con el equipo disponible, aunque también se ha aportado información sobre aquellos aspectos que se pueden desarrollar en un futuro cuando se quiera completar el equipo de ultrasonidos con los componentes restantes. Por tanto en este capítulo se ha conseguido extraer la información necesaria para que alguien que no conozca esta técnica de Ensayos No Destructivos mediante ultrasonidos, pueda tanto utilizar de forma correcta la unidad de ultrasónica, como realizar los ensayos propuestos en este trabajo.

En tercer lugar y último lugar, se ha realizado un guion de prácticas para su utilización como parte de una práctica real de los alumnos de Tecnología de Materiales. Este apartado puede considerarse como el objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado, por lo que se ha intentado realizar acorde a la forma propuesta por el tutor de dicho trabajo.

7. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Por un lado se han presentado todas las aplicaciones disponibles del equipo, para más adelante poder desarrollar otro tipo de actividades, como por ejemplo el análisis de frecuencia, cálculo de velocidades de sonido en diferentes materiales, etc.

Por otro lado, cuando se disponga de más componentes que completen el equipo, se podrán realizar otros tipos de ensayos que han quedado explicados a falta de realización y obtención de los resultados.

Una segunda etapa de desarrollo consistirá en poder determinar el módulo de elasticidad de las probetas utilizadas y de otras de diferentes materiales que se preparen. También se pueden preparar probetas con defectos ocultos para que el alumno los detecte.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. **Medina, Verónica García.** *Ultrasonidos-Técnicas no destructivas para el estudio de monumentos.* Sevilla : Universidad de Sevilla, 2013.
2. *El ultrasonido y su aplicación.* **E. Santos de la Cruz, N. Cancino Vera, J. Yenque Dedios, D. Ramírez Morales y M. Palomino Pérez.** 1, s.l. : Revista Facultad de Ingeniería Industrial, 2005, Vol. VIII.
3. **Ortega, Javier Domínguez.** *Simulación de la propagación ultrasónica en piezas metálicas para su aplicación en la detección de defectos.* Santander : Universidad de Cantabria., 2013.
4. **Pérez, Javier Juan-Senabre.** *Estudio de las propiedades de propagación de los ultrasonidos en un medio viscoso.* Gandía : s.n., 2013.
5. **González, Cristina Rodríguez.** *Sistema automatizado de detección de defectos en piezas metálicas mediante ensayos no destructivos con ultrasonidos.* Santander : Universidad de Cantabria, 2012.
6. *Pruebas Ultrasónicas.* **Matzkanin, George A. y Yolken, H. Thomas.** 3, Nueva York : AMMTIAC, 2009, Vol. II.
7. **Rimoldi, Claudio y Mundo, Luis Mariano.** Ensayo no destructivo por método de ultrasonido. [En línea] [Citado el: 10 de Noviembre de 2015.] <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Apunte%20Ultrasonido%202012.pdf>.

8. Vibraciones y ondas. [En línea] [Citado el: 10 de noviembre de 2015.]
http://www.iesandalus.com/joomla3/images/stories/FisicayQuimica/Fis2B/t5_ondas.pdf.
9. *Análisis de las ondas de Lamb generadas por impacto en placas compuestas*. **A. Luna Avilés, L.H. Hernandez Gómez, G. Urrolagoitia Calderón, G. Urrolagoitia Sosa, J.A. Beltrán Fernandez**. 34, Mexico D.F. : TESCoatl, 2011.
10. Fenómenos ondulatorios-Reflexión. [En línea] CIDEAD. [Citado el: 11 de Diciembre de 2015.]
http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esofisicaquimica/4quincena11/4q11_contenidos_1a.htm.
11. **García, M. J.** Determinación del índice de refracción de materiales transparentes. [En línea] [Citado el: 15 de Noviembre de 2015.] <http://www.ual.es/~mjgarcia/practica9.pdf>.
12. **Holman salgado, Ronal Camacho**. DIFRACCIÓN-Apreciación sonora. [En línea] Enero de 2015. [Citado el: 15 de Noviembre de 2015.] <http://documents.mx/documents/presentado-por-holman-salgado-ronal-camacho-apreciacion-sonora.html>.
13. Propiedades de las ondas-Interferencias. [En línea] IES Leonardo Da Vinci. [Citado el: 15 de Noviembre de 2015.]
<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Ondas/Ondas11.htm>.
14. **Lima, Antonio**. Efecto Piezoléctrico-Conceptos. [En línea] 2011. [Citado el: 3 de Diciembre de 2015.] <https://issuu.com/antoniolimay/docs/2-efecto-piezo-electrico-conceptos-basicos>.
15. La prueba d eultrasonido. [En línea] 2010. [Citado el: 21 de Diciembre de 2015.]
http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/PRUEBA%20DE%20ULTRASONIDO.pdf.
16. **Herreros, Jose Antonio Benítez**. *Estudio de la evolución de la velocidad de ultrasonidos en probetas de hormigón con distintos grados de humedad*. Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2011.
17. Inspección y diagnóstico técnico. [En línea] Isotec, 2010. [Citado el: 11 de Enero de 2016.]
<http://www.isotec.com.co/portal2/index.php?id=53>.

