



**INSTITUTO DE
TECNOLOGIA**

PROF. JORGE A. SABATO

**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE GENERAL SAN MARTIN
COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA**

**MAESTRIA EN
CIENCIA Y
TECNOLOGIA
DE MATERIALES**

**ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE
TÉCNICAS DE DIFRACCIÓN
ULTRASÓNICA PARA EL
DIMENSIONAMIENTO DE
DISCONTINUIDADES EN
COMPONENTES DE ALTO
COMPROMISO TECNOLÓGICO**

Oscar Chaverri Quirós

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
“Prof. Jorge A. Sabato”**

**“ Estudio e implementación de técnicas de difracción
ultrasónica para el dimensionamiento de discontinuidades
en componentes de alto compromiso tecnológico (*) ”**

Por Ing. Oscar Chaverri Quirós

Directores

**Ing. Pablo Katchadjian
Ing. Carlos A. Desimone**

(*) Tesis para optar al título de Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales

República Argentina

2002

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
CENTRO DE INFORMACION C A C

**A Dios y la Virgen María
y a todas aquellas personas
que de una u otra forma
me inspiraron y ayudaron para
hacer éste trabajo.**

Agradecimientos

Hago un agradecimiento muy especial a todas aquellas personas y organismos internacionales que de una u otra forma, han trabajado para regalarme la maravillosa oportunidad de realizar la Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales.

A todas las personas y equipos de trabajo del Instituto Jorge A. Sábato, que desde un inicio me han dado todo el apoyo no solo en el campo profesional sino que también me han regalado mucho cariño y aprecio.

A todo el Departamento de Ensayos No Destructivos por haber aceptado la realización del trabajo en sus instalaciones. Le agradezco de forma muy especial a mis dos directores de tesis, Ing. Carlos Desimone e Ing. Pablo Katchadjian, por haber aceptado la dirección y por haberme transmitido tantos y tan valiosos conocimientos durante el transcurso de todo este tiempo. Gracias infinitas a todas las personas del departamento ya que siempre me facilitaron las actividades y me trataron de una forma muy especial.

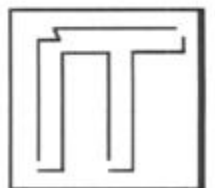
A todos mis compañeros de la Maestría por su apoyo incondicional a lo largo de estos dos años y por ayudarme a desempeñar un buen papel dentro de ella.

A todas aquellas personas de los diferentes departamentos dentro del Centro Atómico Constituyentes que también me dieron su ayuda y me regalaron una muy bonita amistad.

A toda mi familia, amigos y amigas que desde Costa Rica me dieron su apoyo en todo momento y que a pesar de la distancia siempre estuvieron a mi lado.

Sobre todas las cosas doy gracias a Dios por darme el regalo de cumplir un sueño.

Resumen



Resumen

Los ensayos no destructivos (END) en la actualidad cumplen una función de suma importancia dentro de la industria nuclear, aeroespacial y en todas aquellas cuyos componentes poseen un alto compromiso tecnológico. El objetivo principal de estos ensayos es la detección y caracterización de discontinuidades empleando para ello diferentes técnicas. Una de las más utilizadas es el ultrasonido ya que los resultados son inmediatos y permite almacenar los datos de las inspecciones para su posterior análisis.

Gracias a la implementación de nuevas técnicas ultrasónicas como la de difracción, se ha logrado obtener información importante de las discontinuidades como por ejemplo su posición, tamaño y orientación. El hecho de conocer el tamaño de una fisura proporciona un dato de mucho valor para la mecánica de la fractura ya que con este se puede estimar con mucha precisión, la vida útil de los componentes en servicio. Esto permite a su vez hacer un seguimiento de la propagación de fisuras presentes en los materiales sometidos a cargas cíclicas (fatiga), o bien, provocadas por otros agentes externos. En este trabajo se estudiarán las fisuras provocadas por fatiga además de las ranuras obtenidas mediante electroerosión tanto en bloques de acero como de aluminio.

La técnica de difracción consiste en estudiar aquellas señales ultrasónicas cuyo origen se encuentra en los bordes de las discontinuidades. En un inicio se estudian las señales causadas por ranuras de aproximadamente 0.3 mm de apertura y de diferentes profundidades tanto en el acero como en el aluminio y posteriormente se procede a analizar fisuras reales provocadas mediante fatiga. En todos los casos se emplea un equipo digital de ultrasonido así como transductores monocristal de 4 MHz con diferentes ángulos de incidencia (45° , 60° y 70°). Además, las técnicas empleadas en todos los casos son la de pulso-eco y la de transmisión por reflexión, donde la representación de las señales es del tipo A.

Las ranuras hechas por electroerosión que sirven como patrón de calibración, se encuentran orientadas con ángulos de 20° , 40° , 60° , 80° y 90° respecto de la superficie a partir de la cual se extienden. Esto se hace con el objetivo de observar el comportamiento de cada señal difractada y empleando tres técnicas de adquisición de datos que conoceremos con las letras **A** (basada en la medición de ecos de difracción y de reflexión), **B** (basada únicamente en la medición de señales de difracción al realizar pequeños movimientos del palpador) y **C** (comúnmente conocida con el nombre de tandem) se podrá determinar cuál de ellas es la mejor para cada uno de los casos citados. También con la ayuda de ciertas herramientas de la estadística se observará si los datos entre una y otra técnica pueden variar significativamente.

Por último, toda la información recopilada servirá para la implementación de estas técnicas, en los diferentes trabajos de inspección que lleve a cabo el departamento de ensayos no destructivos y estructurales, en componentes de alto compromiso tecnológico, que posean una geometría sencilla.

Abstract

The Non-Destructive Testing (NDT) fulfill at the present time a function of supreme importance inside the nuclear, aerospace industry and in all those whose components own a high technological liability. The main objective of these trials is the detection and characterization of discontinuities using for it different techniques. One of those most used ones had been the ultrasonic test because the results are instantaneous and it allows to store the data of the inspections for their posterior analysis.

Thanks to the implementation of new ultrasonic techniques as the diffraction, it has been possible to obtain important information of the discontinuities like for example their position, size and orientation. The fact of knowing the crack's size provides important information for the fractomechanics because with this it can be considered with much precision, the useful life of the components in service. This allows to make a pursuit of the propagation of cracks in materials subjected to recurrent loads (fatigue), or caused by other external agents. In this work the cracks that will be studied are the fatigue ones besides grooves obtained by means of electroerosión in steel and aluminum blocks.

The diffraction technique consists on measuring the ultrasonic signals whose origin is in the borders of the discontinuities. First, the indications studied are caused by grooves of approximately 0.3 mm of width and different deep extensions in steel and aluminum, later real fissures caused by means of fatigue are studied. In all the cases a digital ultrasonic equipment is used, as well as monocrystal transducers of 4 MHz of different incidence angles (45° , 60° and 70°). Also, the used techniques in all the cases are pulse-echo and transmission by reflection, the representation that will be use is the A type.

The grooves made by electroeroation that serve as calibration pattern, are oriented in angles of 20° , 40° , 60° , 80° and 90° with regard to surface from it extends. This is made with the objective of observing the behavior of each diffraction signal and using three techniques of data acquisition that we will know as **A** (based on diffraction and reflection signals), **B** (based on diffraction signals and little transducers movements) and **C** (known as tandem technique) we will determine which is the best for each of the mentioned cases. Also with the help of certain tools of the statistics it will be observed if the data between one and another technique can vary significantly.

Finally, all the gathered information will be good for the implementation of these techniques in the different inspection works that it carries out the department of NDT, in components of high technological liability with simple geometry.

Índice General

Título	Página
Resumen	ii
Abstract	iii
Introducción	2
I. Ultrasonido industrial	
1.1 Introducción	5
1.2 Principios de ultrasonido	6
1.3 Propagación de las ondas ultrasónicas	7
1.4 Variables más importantes en ultrasonido	9
1.5 Refracción y conversión de modo	11
1.6 Atenuación del haz ultrasónico	12
1.7 Transductores	16
1.8 Detección ultrasónica de discontinuidades	20
1.9 Representación de los resultados del ensayo	23
II. Dimensionamiento de discontinuidades	
2.1 Introducción	26
2.2 Eco de un reflector en un campo ultrasónico	27
2.3 Métodos de dimensionamiento	29
2.4 Factores que influyen en el dimensionamiento de discontinuidades	34
2.5 Características de los transductores	35
III. Métodos de dimensionamiento empleando la difracción ultrasónica	
3.1 Introducción	40
3.2 Interacción haz de ultrasonido-discontinuidad	40
3.3 El proceso de difracción	41
3.4 Técnicas de dimensionamiento	43
3.5 Selección de transductores	44
3.6 Tipos de discontinuidades detectables	46
3.7 Ventajas y limitaciones de las técnicas de difracción	47
IV. Sección experimental	
4.1 Introducción	50
4.2 Construcción de las probetas	50
4.3 Caracterización de los equipos de ultrasonido	57
4.4 Caracterización de los transductores	60
4.5 Calibración general del equipo	65
4.6 Técnicas de dimensionada empleadas	68
4.7 Tratamiento de errores experimentales	71
4.8 Ensayo de flexión	73
4.9 Construcción de zapatas	75

V. Resultados experimentales

5.1 Resultados cuantitativos de los ensayos	78
5.1.1 Medición de la atenuación ultrasónica	78
5.1.2 Mediciones realizadas con ondas transversales	79
A) Señales observadas en las probetas No.1 y No. 2	85
B) Señales observadas en las probetas No.3 y No. 4	87
5.1.3 Mediciones realizadas con ondas longitudinales	90
5.2 Resultados cualitativos de los ensayos	94
5.2.1 Resultados para la probeta No. 5	94
A) Mediciones realizadas con ondas transversales	95
B) Mediciones realizadas con ondas longitudinales	96
5.2.2 Resultados para la probeta No. 6	98
A) Mediciones realizadas con ondas transversales (ranura horizontal)	98
B) Mediciones realizadas con ondas transversales (ranura vertical)	99
C) Mediciones realizadas con ondas longitudinales (ranura horizontal)	100
D) Mediciones realizadas con ondas longitudinales (ranura vertical)	100
5.2.3 Resultados de las probetas 7 y 8 (ensayo de flexión)	101
A) Observaciones del ensayo (probeta No. 7)	101
a) Cálculo de la apertura de la fisura	103
B) Observaciones del ensayo (probeta No. 8)	103
a) Cálculo de la apertura de la fisura	104

VI. Análisis de resultados

6.1 Dimensionamiento de discontinuidades	106
6.1.1 Probeta No. 1	106
6.1.2 Probeta No. 2	109
6.1.3 Probetas No. 3 y No. 4	113
6.1.4 Probeta No. 5	119
6.1.5 Probeta No. 6	122
6.1.6 Probetas No. 7 y No. 8	125

VII. Conclusiones

7.1 Construcción de las probetas	128
7.2 Dimensionamiento de discontinuidades	128
7.3 Construcción de zapatas	129
7.4 Ensayo de flexión	130

VIII. Desarrollos a futuro

	132
--	-----

Referencias bibliográficas

	134
--	-----

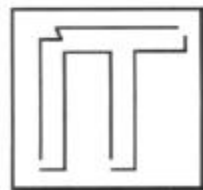
Anexo 1: Propiedades acústicas de algunos materiales

	137
--	-----

Anexo 2: Cálculo de errores relativos para cada técnica

	139
--	-----

Introducción



Introducción

En la actualidad, sabemos que no es suficiente saber que un material tiene defectos sino que además es de suma importancia conocer también el efecto que dichas discontinuidades pueden producir en la integridad del componente y por lo tanto, en la estructura que lo contiene.

Los ensayos no destructivos han sido una herramienta muy utilizada para detectar y ubicar defectos dentro de las estructuras, todo esto sin modificar ninguna de las propiedades de su funcionamiento. Pero ahora no basta con sólo eso sino que es necesario precisar el tamaño de las discontinuidades presentes. Y de hecho no es una tarea fácil ya que pueden haber muchas variables que pueden afectar los resultados obtenidos. Factores como la orientación, apertura, tamaño, forma, ubicación y origen son algunos de los muchos causantes de la poca exactitud con que se realiza el dimensionado de discontinuidades y son por lo tanto, los que hacen de las inspecciones una labor difícil. Pero gracias a la gran versatilidad de una de las más importantes técnicas de ensayo, el ultrasonido, se ha podido avanzar en este campo y se han logrado obtener resultados sumamente precisos dando como resultado un aumento en la vida útil de los componentes y dando una gran seguridad a la hora de la prestación del servicio.

Durante los años de aplicación de la técnica ultrasónica, esta ha servido principalmente para detectar discontinuidades y realizando un esfuerzo importante, se podría lograr también dimensionar de forma aproximada la discontinuidad que ha sido descubierta. Por mucho tiempo, el método empleado con mayor frecuencia y que a su vez es aceptado por muchas normas, ha sido el basado en la amplitud de las señales. O sea que, una vez detectado un defecto, observando el comportamiento de su señal al realizar desplazamientos sumamente cuidadosos sobre la superficie inspeccionada, se puede ir trazando el contorno de dicha discontinuidad. Esto se puede hacer tomando un criterio, como por ejemplo, cuando la señal proveniente del reflector ha decaído 6 dB por debajo de su máxima amplitud. Lo cual significa que el haz de ultrasonido se encuentra en uno de sus bordes y de esta forma, se va trazando toda su extensión dentro del componente. El anterior es un criterio poco preciso porque la dimensión obtenida se encuentra influenciada por muchas variables que afectan la determinación: características del transductor empleado, orientación del defecto respecto del haz incidente, tipo de sustancia con la que pueda estar rellena la discontinuidad, atenuación propia del material estudiado, estado de la superficie y eficiencia de acoplamiento entre el palpador y la pieza.

Con el objetivo de tratar de mejorar la exactitud con que se realizaba el dimensionado de las discontinuidades y para facilitar esta labor, se desarrollaron otras técnicas como las que emplean diagramas o escalas pero, a pesar de que facilitan enormemente las inspecciones y el dimensionado se hace más preciso, siempre son técnicas que dependen totalmente de la amplitud de la señal observada en los equipos ultrasónicos.

El principal objetivo de los ensayos por ultrasonido era en un principio, la detección de defectos como ya hemos dicho, por lo que todos aquellos componentes defectuosos eran removidos y sacados de servicio. Sin embargo, en los inicios de los años 70 la habilidad para descubrir fallas pequeñas llevó a una situación poco satisfactoria porque eran rechazadas muchas piezas, aunque la probabilidad de falla no había cambiado. Debido a esta razón se desarrolló una nueva disciplina que hoy conocemos con el nombre de Mecánica de Fractura, esta permitió predecir si una discontinuidad de cierto tamaño causaría la falla del componente sometido a determinadas cargas de trabajo. Gracias a esto se desarrollaron nuevas pautas para predecir el grado de crecimiento de fisuras como por ejemplo las de fatiga, por lo que la determinación del tamaño de los defectos hizo muy práctica la aceptación o rechazo de las estructuras que los contienen. Lo anterior significa que los componentes que poseen discontinuidades podrían continuar prestando el servicio hasta tanto dichas discontinuidades no sobrepasen un cierto tamaño crítico. Por lo tanto es de suma importancia poder descubrir las fallas pero más aún, conocer el tamaño exacto de éstas para poder determinar de esa forma, la vida útil del componente.

Como respuesta a una incansable labor de centros de investigación en ensayos no destructivos alrededor del mundo, para conseguir técnicas que puedan dar un dato confiable del tamaño de un reflector en un componente y que este fuese totalmente independiente de su amplitud, fue que en Inglaterra se originó uno de los métodos más precisos de dimensionado pero que como los anteriores, también es susceptible a errores. Este nuevo método tiene su origen en aquellos fenómenos físicos que involucran la transmisión de energía por medio de ondas. Dicho fenómeno se llama "difracción" y este se basa en el principio de que cada punto a lo largo de un frente de ondas puede considerarse como una fuente de nuevas ondas. Lo anterior explica el por qué las ondas ultrasónicas se curvan hacia las áreas de sombra geométrica desde la fuente y es el mismo principio por el cual escuchamos el sonido propagado en un medio conteniendo obstáculos.

A esta técnica se le conoce como “tiempo de vuelo de la difracción” que proviene del inglés “time of flight diffraction (TOFD)” y pareciera ser la solución a los problemas de detección y dimensionado mediante ultrasonido. Esta modalidad de ensayo que es resultado de la interacción de un haz de ultrasonido con un obstáculo que en nuestro caso será una discontinuidad, ha dado un gran impulso en el desarrollo de nuevos equipos y ha promovido la investigación en este campo.

Algunas de las principales características de la técnica TOFD son:

- Provee una alta velocidad de inspección.
- Permite no sólo detectar sino también dimensionar discontinuidades.
- Los requerimientos de calibración con bloques son mínimos.
- Provee una alta precisión de dimensionado.
- Permite guardar la información del ensayo para su posterior análisis.

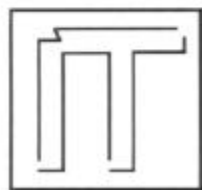
Cuando se utiliza la técnica TOFD para inspeccionar distintos tipos de piezas, es común que dicha técnica sea empleada en conjunto con alguna otra del tipo convencional y que además sea realizada por una persona con alto nivel de preparación. Típicamente, cada técnica tiene su propio criterio de aceptación basado en sus respectivas capacidades y limitaciones, todo con el objetivo de conseguir un alto nivel de calidad durante las inspecciones. Algunos factores como los económicos, los técnicos, los de confiabilidad y de seguridad determinan cuál técnica es la que debería emplearse para cada caso en particular. Los criterios de aceptación para la técnica TOFD están basados muy comúnmente en los ya obtenidos para las técnicas de pulso-eco y radiografía, cuya ventaja es que dichos criterios ya han sido probados con anterioridad.

Cabe destacar que la técnica TOFD puede distinguir de manera confiable distintos tipos de discontinuidades como los planares o volumétricos, pero muchas veces sucede que para dichos ensayos no se cuenta con un criterio de aceptación, teniéndose que realizar una caracterización de los defectos con las técnicas convencionales de ensayo. El resultado de esto es un dimensionamiento aproximado de la discontinuidad e incluso muchas veces puede no ser detectada.

A nivel mundial se han hecho programas como los llamados “PISC” y otros a nivel local como DDT (Inglaterra), NIL (Holanda), EPRI (Estados Unidos), con el objetivo de estudiar más a fondo las técnicas aplicadas para la detección y el dimensionamiento de diferentes tipos de discontinuidades, y además para lograr obtener criterios de aceptación para las nuevas técnicas que sean mucho mejores que los establecidos para las técnicas convencionales y para obtener mayor calidad en los trabajos que sean realizados. Los resultados obtenidos demuestran que la técnica TOFD es la más precisa para detectar y dimensionar discontinuidades, aunque si bien es cierto que todo nuevo desarrollo tecnológico tiene que superar muchas dificultades para poder obtener resultados mucho mejores. Este trabajo se encuentra enfocado en ese sentido, en demostrar que aún para geometrías sencillas se deben considerar muchas variables que pueden afectar el dimensionado de discontinuidades, pero a la vez se demuestra que las técnicas basadas en la difracción son aptas para determinar la extensión de reflectores ubicados en diferentes configuraciones.

El presente texto ha sido estructurado de forma tal que toda la base teórica explicada sea utilizada de forma exhaustiva en la parte práctica del mismo. En una primera parte se abarca todo lo concerniente a lo que es el ultrasonido y sus principales características aplicativas dentro de este tipo de ensayo. En una segunda parte se retoma el tema del por qué es importante realizar un buen dimensionamiento así como las técnicas empleadas para esto. En la tercera parte se trata de resumir en forma clara y concisa todo lo relacionado con el fenómeno de la difracción ultrasónica. En una cuarta parte se expone todo lo correspondiente a los datos empleados durante los experimentos; esta sección es de suma importancia porque demuestra la forma en la que fueron realizadas las mediciones y la forma en que se obtuvieron los resultados. Seguido de las anteriores partes se muestran todos los resultados prácticos, luego su análisis correspondiente y por último se muestran las conclusiones y lineamientos a emplear en un futuro.

Parte I



Parte I: “Ultrasonido Industrial”

1.1 Introducción

Muchos años han pasado desde la invención de la prueba no destructiva por ultrasonido. El primer intento por detectar fallas en los materiales por ultrasonido fue desarrollado por los años veinte. Desde la primera aplicación, el ultrasonido dejó de ser una simple curiosidad, para comenzar una revolución que ha alcanzado campos tan diversos como la medicina, la ingeniería, la aeronáutica, etc.

A manera de introducción, se puede decir que el ultrasonido son ondas acústicas de idéntica naturaleza que las ondas sónicas, diferenciándose de éstas en que su campo de frecuencias es superior a la zona audible. Las ondas ultrasónicas exhiben una característica que las hace extraordinariamente útiles: cuando viajan por un medio cualquiera sea este, son reflejadas si existe una discontinuidad o alguna sustancia extraña en su trayectoria, estos ecos son capturados, analizados y la causa descubierta. El ultrasonido ha dejado al descubierto un mundo de permanencia invisible; intercambiadores de calor de una central nuclear muestran de repente sus grietas y desperfectos, inapreciables al ojo humano, materiales metálicos de gran tamaño son inspeccionados para encontrar defectos en el interior, los niños son monitoreados en pantalla antes de nacer, y los barcos pesqueros encuentran los bancos de peces con haces de ultrasonido [1].

El desarrollo reciente del método de inspección por ultrasonido esta relacionado en primera instancia con lo siguiente:

- Alta velocidad en la aplicación de sistemas automatizados de inspección.
- Instrumentos mejorados para obtener una gran resolución en la detección de fallas.
- Una mejor presentación de los datos.
- Interpretación simple de los resultados.
- Estudio avanzado de los cambios de las estructuras metalúrgicas.
- Análisis detallado de los fenómenos acústicos involucrados.

Durante este mismo período aquello relacionado directamente con la aplicación del método de inspección por ultrasonido ha contribuido en el establecimiento de procedimientos y normas, particularmente en la industria aeronáutica, eléctrica y en el campo de la energía nuclear. Ya que la inspección por ultrasonido es básicamente un fenómeno mecánico, es adaptable para determinar la integridad estructural de los materiales de ingeniería, se utiliza en el control de calidad e inspección de materiales en diferentes ramas de la industria y sus principales aplicaciones consisten en [2]:

- Detección y caracterización de discontinuidades.
- Medición de espesores, extensión y grado de corrosión.
- Determinación de características físicas como: tamaño de grano, constantes elásticas y estructura metalúrgica.
- Características de adherencia entre dos materiales.

1.1.1 Ventajas de las pruebas por ultrasonido

1. Proporciona gran poder de penetración, lo que permite la inspección de grandes espesores.
2. Se tiene gran sensibilidad, ya que se pueden detectar discontinuidades extremadamente pequeñas (idealmente de hasta $\frac{1}{4}$ de λ).
3. Proporciona gran exactitud para determinar la posición, estimar el tamaño, orientación y forma de discontinuidades.
4. Se necesita una sola superficie de acceso para llevar acabo la inspección.
5. Los resultados son obtenidos en forma inmediata.
6. No existe peligro o riesgo humano en su aplicación.
7. La portabilidad de los equipos, capacidad de almacenar información en memoria y conectarse con una computadora.
8. El costo de los equipos es relativamente bajo.

1.1.2 Desventajas

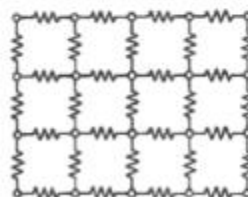
1. Se requiere un entrenamiento elevado y continuo de los operadores para realizar una interpretación adecuada de las señales obtenidas durante los ensayos.
2. Siempre se hace necesario el empleo de un acoplante entre el palpador y la pieza que va a ser estudiada especialmente en aquellos casos donde la superficie de inspección es muy rugosa.
3. La calibración del sistema de ensayo y la determinación de ciertas características de las discontinuidades requiere el uso de muestras patrón o de referencia.

1.2 Principios de ultrasonido

El ultrasonido no se diferencia, en cuanto a sus características fundamentales, del sonido perceptible a través del oído. Dicho con más sencillez, son ondas acústicas de idéntica naturaleza que las ondas sónicas. Ahora bien, que es lo que se mueve en la materia a través de la cual se propaga.

Bueno supongamos que esta materia se compone de pequeñas partículas unidas entre si por medio de una fuerza elástica. Siendo así, es factible un movimiento de dichas partículas a partir de su posición fija, si se desplaza una partícula fuera de su posición de equilibrio, esta empieza a oscilar y comunica su energía a las partículas vecinas (figura 1.1).

Fig. 1.1 Modelo del cuerpo elástico.



Para facilitar los cálculos y para entender mejor el fenómeno de propagación del ultrasonido, se ha supuesto que la excitación inicial es continua y del tipo sinusoidal [3], además se hace una analogía con la oscilación elástica que sufre un resorte cuando es cargado, tal y como se muestra a continuación.

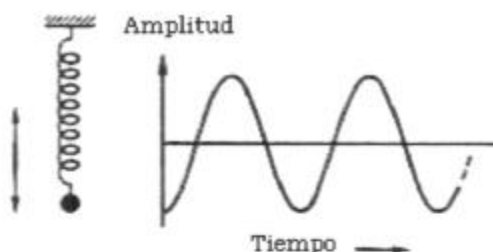


Fig. 1.2 Oscilación sinusoidal de un resorte cargado.

La energía aplicada se propaga, por tanto a través de las partículas individuales de la materia y estas experimentan oscilaciones armónicas. El número de oscilaciones o vibraciones de las partículas nos dice si se trata de sonido perceptible por el oído humano o de ultrasonido. El ultrasonido, es superior a los 20.000 ciclos/seg. Estos 20.000 Hz o 20 KHz como límite entre el ultrasonido y el sonido perceptible han sido fijados arbitrariamente.

En la inspección de materiales metálicos por ultrasonido, las frecuencias son, por regla general, notablemente más elevadas y oscilan entre 0.25 y 25 MHz. En principio, las ondas ultrasónicas pueden propagarse dentro de todos los medios donde existen fracciones de materia, o sea, átomos o moléculas capaces de vibrar, por lo que se propaga a través de gases, líquidos y sólidos. Por el contrario no podrán producirse en el vacío, por no existir elementos de la materia que las sustenten. Las ondas ultrasónicas se propagan en cualquier material elástico cuando las partículas atómicas o moleculares de un material elástico son movidas desde su posición en equilibrio por cualquier fuerza aplicada; esfuerzos internos actúan para restablecer las partículas a su posición original. El desplazamiento de la materia que ocurre debido a las ondas ultrasónicas es extremadamente pequeño pero la amplitud, el modo de vibración y la velocidad de las ondas difiere en los sólidos, líquidos y gases básicamente por la separación de las partículas en cada estado de la materia. Estas diferencias influyen las fuerzas de atracción entre las partículas y los medios elásticos de la materia.

1.3 Propagación de las ondas ultrasónicas

El principio del ensayo ultrasónico está basado en el hecho de que los materiales sólidos son buenos conductores de dichas ondas, como ya se ha mencionado. Por lo tanto las ondas no son únicamente reflejadas por las interfaces sino también por discontinuidades internas (separaciones de material, inclusiones, etc.). El efecto de interacción de las ondas de ultrasonido con la materia involucra tres parámetros de mucha importancia, los cuales se relacionan de la forma que indica la ecuación 1 y que se explica más adelante:

$$\text{ec. 1} \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

c = velocidad de propagación del sonido [m/s]
 f = frecuencia [Hz]
 λ = longitud de onda [m]

La amplitud de la onda ultrasónica en el medio elástico depende de la cantidad de energía suministrada, mientras que la velocidad de propagación depende de las propiedades del material en el cual se propaga. Variando estos parámetros, se originan diferentes comportamientos de dichas ondas como veremos a continuación.

1.3.1 Tipos de ondas

Tomando como base el tipo de desplazamiento que las ondas provocan sobre las partículas con las que interactúa, estas se pueden clasificar, de manera muy general [4], de la forma siguiente:

- Ondas longitudinales.
- Ondas transversales.
- Ondas superficiales.
- Ondas de Lamb.

A) Ondas longitudinales (compresión)

Este tipo de ondas se consiguen cuando se hacen oscilar las partículas en la misma dirección con que la onda se propaga. El primer plano de partículas es puesto en movimiento y transmite la energía de movimiento a los planos siguientes de partículas y si todas ellas estuvieran simultáneamente en movimiento se dice que están en una misma fase. Pero como las partículas en realidad están unidas elásticamente entre sí, sucede que los planos siguientes de partículas se retrasan en su movimiento (figura 1.3).

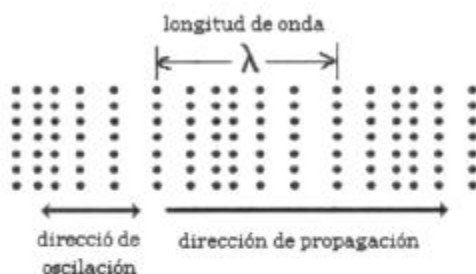


Fig. 1.3 Diagrama de una onda longitudinal.

Ahora teniendo en cuenta el tipo de material en el cual se propaga dicha onda, se puede obtener la siguiente relación:

$$\text{ec. 2} \quad c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

c_l = velocidad de la onda longitudinal [m/s]
 E = módulo de elasticidad (módulo de Young) [N/m²]
 ρ = densidad [Kg/m³]
 μ = relación de Poisson [adimensional]

B) Ondas transversales (corte)

Con las ondas transversales los átomos o las moléculas oscilan perpendicularmente respecto de la dirección de propagación de dicha onda (figura 1.4) ya que la excitación es realizada por una fuerza de corte.

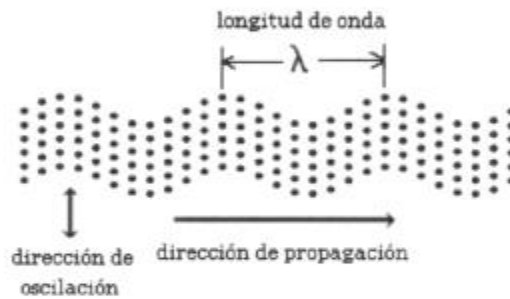


Fig. 1.4 Diagrama de una onda transversal.

De forma análoga a la ecuación 2, se puede obtener la velocidad de la onda transversal en un determinado medio:

$$\text{ec. 3} \quad c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

c_t = velocidad de la onda transversal [m/s]
 E = módulo de elasticidad (módulo de Young) [N/m²]
 ρ = densidad [Kg/m³]
 μ = relación de Poisson [adimensional]
 G = módulo de corte [N/m²]

Y relacionando ambas velocidades tomando como material base al acero (Fe) y al aluminio (Al) nos da el siguiente resultado importante:

$$\text{Fe} \quad \frac{c_t}{c_l} = 0.55 \quad \text{Al} \quad \frac{c_t}{c_l} = 0.49$$

C) Ondas superficiales (Rayleigh)

Para la propagación de este tipo de ondas, estas deben viajar a lo largo de una interface tal y como se muestra en la figura 1.5. Estas ondas superficiales son susceptibles a la atenuación de igual modo que las anteriores. Tienen una velocidad aproximadamente del 90 % de una onda transversal en un mismo material. La región en la cual dicha onda se propaga con una cierta energía efectiva, no es mayor que una longitud de onda debajo de la superficie. A esa profundidad, la energía de la onda es del orden del 4 % de la energía en la superficie y la amplitud de la oscilación decrece abruptamente a mayores profundidades. Se las emplea en las inspecciones de piezas cuya geometría puede ser complicada, ya que éstas ondas siguen el contorno o la forma del objeto por donde se propaga.

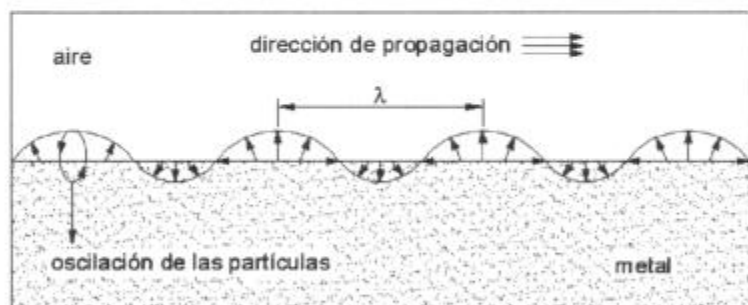


Fig. 1.5 Diagrama de una onda de superficie; las flechas indican la dirección de desplazamiento de las partículas.

D) Ondas de Lamb

También son conocidas como ondas de placa ya que son muy empleadas para inspeccionar este tipo de piezas. Esta consiste de una vibración compleja que ocurre a través del espesor del material. Las características de propagación de estas ondas dependen de la densidad, de las propiedades elásticas y de la estructura del medio, así como del espesor y de la frecuencia empleada.

Existen dos tipos básicos de ondas de Lamb: las simétricas (de dilatación) y las asimétricas (de curvatura). La forma está determinada por el movimiento que sufren las partículas, ya sea simétrico o asimétrico respecto del eje neutro de la pieza (figura 1.6). Cada forma y sus respectivos cambios de modo son controlados por el ángulo de incidencia empleado.

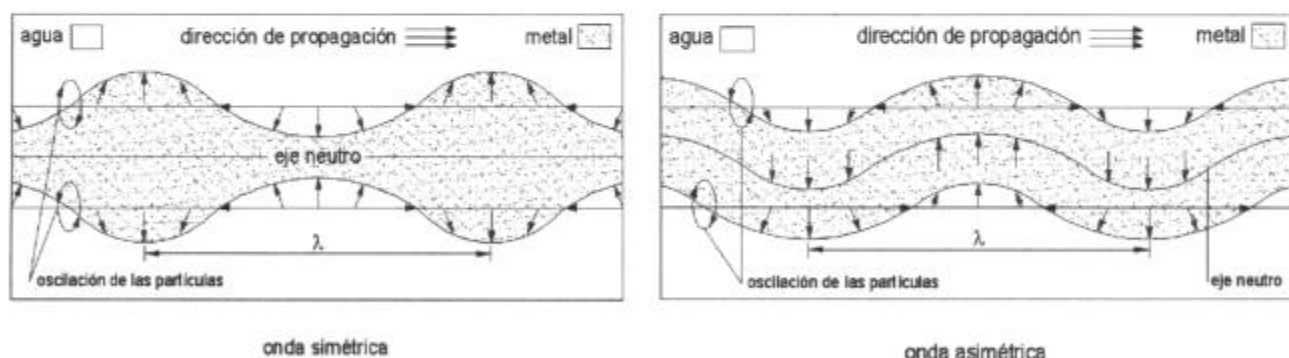


Fig. 1.6 Diagrama de una onda simétrica (expansión) y una onda asimétrica (compresión).

1.4 Variables más importantes en ultrasonido

1.4.1 Frecuencia

La sensibilidad o la habilidad que posee un sistema de inspección ultrasónica para detectar discontinuidades muy pequeñas, se incrementa por lo general empleando frecuencias relativamente altas (cortas longitudes de onda). Además, la capacidad para distinguir las señales provenientes de dos discontinuidades muy cercanas y ubicadas a una misma profundidad (cerca de la superficie o en posiciones laterales) es directamente proporcional al ancho de banda de la frecuencia e inversamente relacionada con la duración del pulso. Por lo tanto la resolución del ensayo en general se mejora con un aumento de la frecuencia. Unido a lo anterior, la frecuencia afecta la penetración de ensayo de manera que para altas frecuencias es baja la profundidad de detección. Sin embargo, cabe destacar que lo anterior puede ser producto de la alta dispersión que sufre el haz en materiales de grano grueso y que por lo tanto para poder detectar reflectores a una dada profundidad será necesario emplear frecuencias bajas. En conclusión, la sensibilidad, la resolución, la penetración y la divergencia del haz (que se verá más adelante) quedan determinados por medio de la selección del transductor y modificados ligeramente por otras variables [5].

1.4.2 Impedancia acústica

Cuando las ondas ultrasónicas viajan de un medio a otro, una porción de la onda incidente es reflejada mientras que otra porción es transmitida al segundo medio. La característica que determina la cantidad de reflexión es la impedancia acústica de los dos medios. Esta se define como la oposición que ejerce un medio a la transmisión de energía producida por las ondas y es propia para cada tipo de material. Si la impedancia es la misma para los dos medios, la reflexión sería mínima; pero si fuesen muy distintas como en el caso de metal y aire se puede decir que la reflexión es máxima.

La impedancia acústica para una onda ultrasónica, Z , está definida como el producto de la densidad del material por la velocidad de propagación de dicha onda (ec. 4):

ec. 4

$$Z = \rho c$$

Z = impedancia acústica [$\text{Kg}/\text{m}^2\text{s}$]

ρ = densidad [Kg/m^3]

c = velocidad de propagación de la onda [m/s]

1.4.3 Presión acústica

En el caso de ondas planas y esféricas, la presión acústica y la amplitud máxima de oscilación están relacionadas por:

$$\text{ec. 5} \quad P = \rho c \omega \xi = Z \omega \xi$$

P = presión acústica [Pa=N/m²]
 ρ = densidad [Kg/m³]
 c = velocidad de la onda [/m/s]
 ω = frecuencia angular [rad/s]
 ξ = amplitud máxima de oscilación [m]

De la ecuación 5 se deduce, que para las ondas longitudinales, la presión acústica es una fuerza por unidad de superficie normal a la superficie ó frente de onda y, para las ondas transversales, una fuerza cortante por unidad de superficie paralela a la superficie ó frente de onda. Aunque la presión acústica es el parámetro más importante en el campo del ultrasonido, la energía específica y la intensidad acústica son también de interés en muchos casos [6].

1.4.4 Energía acústica específica

La propagación de una onda se caracteriza por un transporte de energía y no de masa. La energía presente en la unidad de volumen del medio (que avanza con la velocidad acústica) se denomina energía específica E_e de la onda. En el caso de ondas planas o esféricas se expresa según:

$$\text{ec. 6} \quad E_e = \frac{1}{2} \rho c^2 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 \xi^2 = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho c^2} = \frac{1}{2} \frac{P^2}{Z c} \quad [\text{W/m}^2]$$

1.4.5 Intensidad acústica

Es la cantidad de energía que pasa por unidad de área en la unidad de tiempo. Viene dada por el producto de la energía específica y la velocidad acústica. En el caso de ondas planas y esféricas se obtienen las expresiones siguientes:

$$\text{ec. 7} \quad I = \frac{1}{2} \frac{P^2}{Z} = \frac{1}{2} Z \omega^2 \xi^2 \quad [\text{W/m}^2]$$

Es importante la relación entre la energía específica (o la intensidad acústica) y la presión acústica, ya que la altura de la indicación de un eco en la pantalla del equipo, es proporcional a la presión acústica. Tanto la energía específica como la intensidad acústica son proporcionales al cuadrado de la presión acústica.

También se puede deducir una expresión para la amplitud máxima de oscilación:

$$\text{ec. 8} \quad \xi = \lambda \sqrt{\frac{I}{2\pi^2 \rho c^3}} \quad [\text{m}]$$

Las propiedades acústicas de los materiales son influenciadas por las variaciones en su estructura. Por tanto, el porcentaje de la energía incidente reflejada desde la interface entre los materiales depende de la relación entre sus impedancias ($Z_2/Z_1 = r$).

Por su parte, el coeficiente de reflexión R (ec. 9) se define como la relación entre la intensidad acústica del haz reflejado I_r y la intensidad del haz incidente I_i :

$$\text{ec. 9} \quad R = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = \left(\frac{r - 1}{r + 1} \right)^2$$

Y el coeficiente de transmisión T (ec. 10) se puede obtener de la relación $R + T = 100\%$ o bien de la siguiente manera:

$$\text{ec. 10} \quad T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_2 Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} = \frac{4r}{(r + 1)^2}$$

1.4.6 Angulo de incidencia

Se le llama ángulo de incidencia a la dirección en la cual se orienta el haz de ultrasonido, respecto de la normal de la superficie sobre la cual se coloca el palpador. Cuando el haz se orienta paralelamente a la normal, se dice que el ángulo de incidencia es de 0° ; mientras que para otros ángulos se deben considerar además los fenómenos de cambio de modo (cambio en la naturaleza de movimiento de la onda) y de refracción (cambios en la dirección de propagación de la onda). Todos los cambios posibles van a depender del tipo de material por el cual viajan las ondas.

1.4.7 Angulos críticos

Se conoce con el nombre de ángulo crítico a aquel que a partir de él y en una interface de dos materiales determinados, se obtiene un solo tipo de ondas mientras que para ángulos menores se pueden tener varios tipos. El conocimiento de dicho ángulo es de mucha ayuda en la fabricación de transductores ya que permite conocer el tipo de onda refractada en el material a estudiar.

1.5 Refracción y conversión de modo

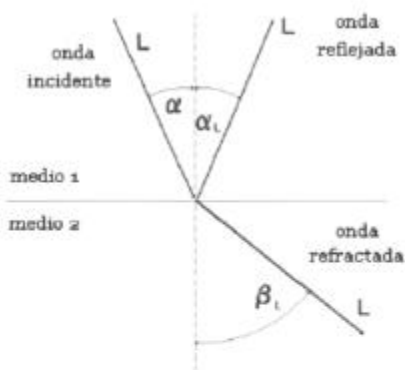
Este fenómeno de refracción o de conversión de modo sucede cuando el haz ultrasónico forma un determinado ángulo con la superficie del componente en estudio [7]. Este efecto de haz angular es fácil de conseguir colocando un palpador normal dentro de una cuña la cual tiene una determinada forma y que normalmente está hecha de un material llamado "perspex". Por lo tanto, si una onda longitudinal con un determinado ángulo de incidencia (ángulo de la cuña o de diseño) impacta la interface metal-perspex, esta se divide en una onda que es reflejada y en una onda que es transmitida, tal y como se indica en la figura 1.7. Aquí las ondas reflejadas obedecen a la ley de reflexión (ángulo de incidencia = ángulo de reflexión) y las ondas transmitidas obedecen la ley de refracción (ley de Snell, ec.11).

Ley de Snell

ec. 11
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

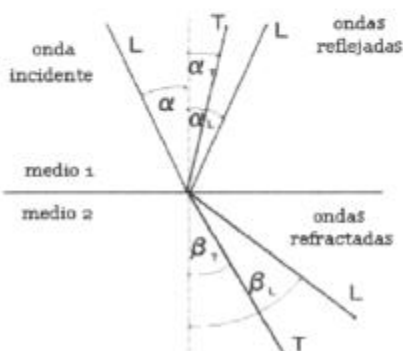
α = ángulo de incidencia
 β = ángulo de refracción
 c_1 = velocidad del sonido en el medio 1
 c_2 = velocidad del sonido en el medio 2

Fig. 1.7 Refracción y reflexión de ondas longitudinales.



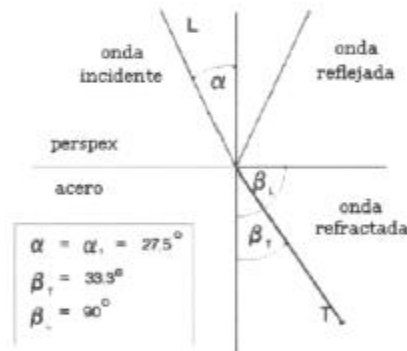
Además se adicionan también ondas transversales en el punto de impacto del haz ultrasónico (fig. 1.8). Esto ocurre tanto en la reflexión como en la refracción. Debido al hecho de que las ondas transversales se propagan a la mitad de la velocidad del sonido respecto de las ondas longitudinales, estas tienen un ángulo menor que corresponde aproximadamente a la mitad del formado por las ondas longitudinales (esto para el sistema aire-acero).

Fig. 1.8 Refracción y reflexión para ondas transversales y longitudinales.



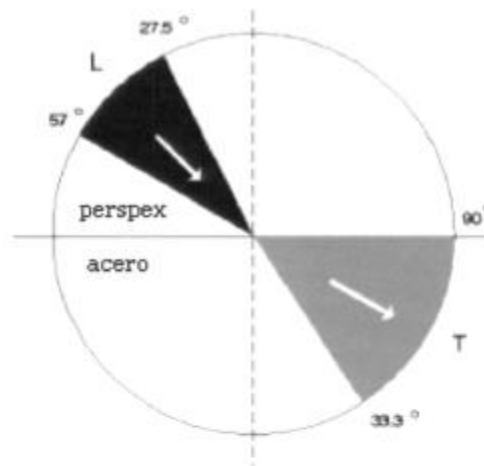
Con un aumento del ángulo de incidencia (para el sistema perspex-acero), el ángulo de refracción también aumenta hasta que finalmente, en un ángulo de incidencia de aproximadamente $\alpha = 27.5^\circ$ (primer ángulo crítico), la onda longitudinal es refractada con un ángulo β de 90° . Lo anterior significa que esta se propaga a lo largo de la interface mientras que la onda transversal todavía se transmite dentro del material inspeccionado (fig. 1.9).

Fig. 1.9 Refracción: primer ángulo crítico.



Ahora con un aumento adicional del ángulo de incidencia, pueden ser obtenidos varios ángulos de refracción de la onda transversal, lo que da origen a los transductores angulares. Finalmente, con un ángulo de incidencia de aproximadamente 57° (segundo ángulo crítico) de onda transversal, ésta es refractada con un ángulo de 90° y se propaga a lo largo de la superficie del componente convirtiéndose en una onda superficial. Este es el límite sobre el cual ninguna onda ultrasónica es transmitida al material que se está inspeccionando. Por tanto, la reflexión total se inicia desde ese punto. Cualquier haz incidente que se encuentre dentro de los límites dados por los ángulos críticos ($27.5^\circ - 57^\circ$ perspex) nos da la seguridad de que podamos obtener señales evaluables provenientes del material también dentro de un cierto rango de ángulos (33.3° y 90° para el acero)

Fig. 1.10 Rango utilizable de palpadores angulares para acero.



1.6 Atenuación del haz ultrasónico

La intensidad de un haz ultrasónico que es captado por un transductor receptor es considerablemente menor que la intensidad de la transmisión inicial. Los factores que son en un inicio responsables de la pérdida de la intensidad del haz, pueden ser clasificados como pérdidas por transmisión, efectos de interferencia y por la propagación del haz.

Las pérdidas por transmisión incluyen a la absorción, la dispersión y los efectos de la impedancia acústica en las interfaces. Los efectos de interferencia incluyen a la difracción y otros efectos que crean ondas de borde, cambios de fase o cambios de modo. Dentro de la propagación del haz se involucra principalmente una transición de ondas planas a ondas del tipo cilíndricas o esféricas, dependiendo de la forma del transductor y del elemento vibrador. Los factores de mayor importancia se estudiarán a continuación [8].

1.6.1 Absorción

Este fenómeno ocurre principalmente por la conversión de energía mecánica a energía calórica. El movimiento elástico dentro de una sustancia provocado por la propagación alternada de la onda, hace que dicha sustancia se caliente durante la compresión y se enfríe durante la expansión. Debido a que el flujo de calor es mucho más lento que el movimiento de la onda ultrasónica, las pérdidas térmicas son muy pequeñas, pero esto hace que se reduzca progresivamente la energía de la onda. Una pérdida térmica relacionada ocurre en los materiales policristalinos; las pérdidas termoelásticas se incrementan debido al flujo de calor que fluye desde los granos que han recibido una mayor compresión o expansión durante el movimiento de la onda.

La absorción puede ser considerada como una acción de frenado del movimiento oscilatorio de las partículas. Esta acción de frenado es más pronunciada cuando las oscilaciones son más rápidas, o sea, a altas frecuencias. Para la mayoría de los materiales, las pérdidas por absorción se incrementan de manera proporcional a la frecuencia empleada en el ensayo.

1.6.2 Dispersión

La dispersión de las ondas ultrasónicas ocurre porque la mayoría de los materiales no son totalmente homogéneos. Discontinuidades cristalinas como lo son los bordes de grano, maclas e inclusiones no metálicas tienden a deflectar pequeñas cantidades de energía ultrasónica fuera del dominio del haz. Además, en microestructuras mixtas o en materiales anisotrópicos, los cambios de modo son muy comunes debido a las pequeñas diferencias en la velocidad y la impedancia acústica entre dichas regiones.

La dispersión es altamente dependiente de la relación entre el tamaño de grano y la longitud de onda. Cuando el tamaño de grano es menor a 0.01 veces la longitud de onda, la dispersión es despreciable. Los efectos de la dispersión varían aproximadamente con la tercera potencia del tamaño de grano y cuando este es 0.1 veces la longitud de onda o mayor, se obtiene una dispersión excesiva y resulta imposible la inspección ultrasónica.

1.6.3 Efectos de la impedancia acústica

La pérdida de intensidad del haz ultrasónico que retorna al transductor es la base para la caracterización de discontinuidades en las piezas de ensayo. Como se ha indicado con anterioridad, las pérdidas por impedancia acústica pueden disminuir severamente la intensidad del haz ultrasónico. Debido a que una pequeña fracción del área del haz es reflejada por discontinuidades pequeñas, es obvio que los instrumentos de ultrasonido deben ser extremadamente sensibles a todas estas pequeñas variaciones de la intensidad para obtener datos confiables y precisos.

1.6.4 Difracción

La razón por la que el dimensionamiento de discontinuidades puede llevarse a cabo incluso en aquellas que no se encuentran orientadas favorablemente, es porque existen otras señales además de las que se reflejan especularmente. Una analogía de este fenómeno ocurre cuando un obstáculo es colocado en el camino de un haz luminoso, donde una fracción de dicho haz tiende a inclinarse hacia la parte donde hay sombra debido al fenómeno de la difracción.

Este efecto sólo se hace notable, por ejemplo, para fallas o discontinuidades que tengan un tamaño por encima de unas pocas longitudes de onda. Lo mismo ocurre con las ondas elásticas, pero, debido a que la longitud de onda (en el caso de ultrasonido) es del orden de unos pocos milímetros o mayor, dichos efectos son comúnmente observados.

Algunos operadores experimentados en la técnica de pulso-eco hacen uso de estas ondas para obtener mediciones precisas de discontinuidades, pero estas tienen que ser identificadas dentro de grandes señales variables cuyo origen se encuentra en la reflexión especular. Como el objetivo de este trabajo es estudiar la difracción como método de caracterización de reflectores, las siguientes secciones retoman este tema y se profundiza en mayor grado sobre el mismo.

1.6.5 Campo cercano y campo lejano

Cada transductor tiene una dada direccionalidad, por lo que las ondas ultrasónicas solo cubren una determinada sección del objeto inspeccionado. El campo efectivo para la prueba ultrasónica es llamado "haz ultrasónico" el cual es característico para cada transductor y material en el cual se propagan las ondas. Un haz de este tipo puede ser dividido en un área convergente (campo cercano), y en una divergente (campo lejano), como se muestra en la figura 1.11. La distancia N del campo cercano y el ángulo de divergencia depende del diámetro del elemento, su frecuencia y la velocidad del sonido del material que es inspeccionado. El centro del haz es también llamado "eje acústico".



Fig. 1.11 Divisiones de un haz de ultrasonido.

La longitud del campo cercano N se puede calcular de la siguiente manera:

$$\text{ec. 12} \quad N = \frac{(D^2 - \lambda^2)}{4\lambda}$$

pero cuando la longitud de onda (λ) es pequeña respecto del diámetro (D) del cristal, la longitud del campo cercano se puede calcular también tomando en cuenta el área (A) del palpador:

$$\text{ec. 13} \quad N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{A}{\pi \lambda}$$

La divergencia del haz comienza a partir de cierta distancia del cabezal, en la proximidad de este el haz es aproximadamente paralelo. La distribución de la presión acústica en esta zona es complicada, ella toma valores máximos y mínimos alternados a medida que aumenta la distancia por lo que las mediciones hechas en este campo no son recomendadas (fig. 1.12).

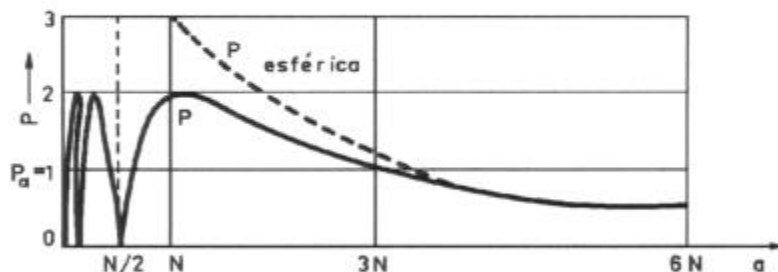


Figura 1.12 Presión acústica P a lo largo del eje de un transductor; la línea de trazos corresponde a la presión acústica de una onda esférica.

Para las distancias mayores a N se forma lo que se conoce con el nombre de campo lejano. En este campo del haz ultrasónico, el frente de onda se expande con la distancia desde el palpador. El ángulo de divergencia γ_0 medido desde el eje central o acústico de un palpador circular está determinado por el diámetro (D) de dicho instrumento y por la longitud de onda (λ), de la siguiente manera:

$$\text{ec. 14} \quad -6 \text{ dB} \quad \text{sen}(\gamma_0) = 0.51 \frac{\lambda}{D}$$

El diámetro del haz ultrasónico también depende del diámetro del palpador, la longitud de onda y una constante k. La ecuación teórica para calcular el diámetro del haz con la técnica de pulso-eco a una distancia z desde el frente del palpador es la siguiente:

$$\text{ec. 15} \quad (\phi \text{ del haz}) = z * k * \frac{\lambda}{D}, \text{ para } -6 \text{ dB } K = 0.51$$

Existen otras formas de representar gráficamente las variaciones que sufre la presión acústica de los transductores tanto en el campo cercano como en el campo lejano. Una de estas representaciones es en la que aparecen líneas de igual presión (representación isobara) como se muestra en la figura 1.13. Dichas líneas conectan todos los puntos de igual presión dentro del campo sónico y usualmente sus valores de presión están dados en escala de decibeles. El valor de -6 dB en la figura indica que la presión ultrasónica en esa isobara es aproximadamente la mitad del valor de referencia, que para este caso se encuentra sobre el eje en la misma sección perpendicular.

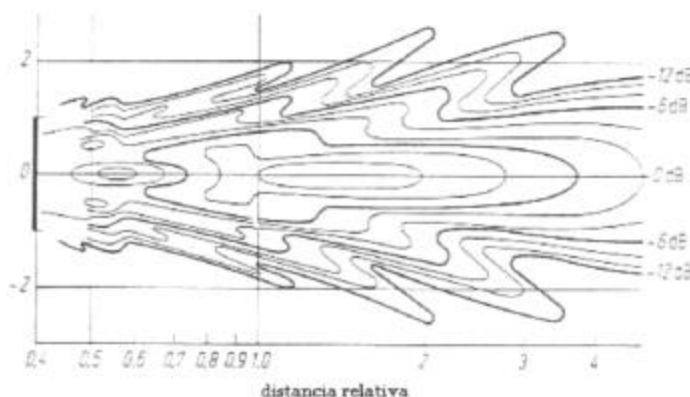


Fig. 1.13 Representación de las líneas isobaras en valores de decibeles; también se muestra la distancia medida en escala logarítmica desde el extremo del transductor.

Otra manera de graficar la presión acústica de un transductor es de forma tridimensional. Si las amplitudes de la presión sónica son representadas en un plano perpendicular al eje, se obtiene un tipo de relieve o montaña tridimensional que indica también la variación de la presión acústica a lo largo del haz, tal y como se muestra en la figura 14.

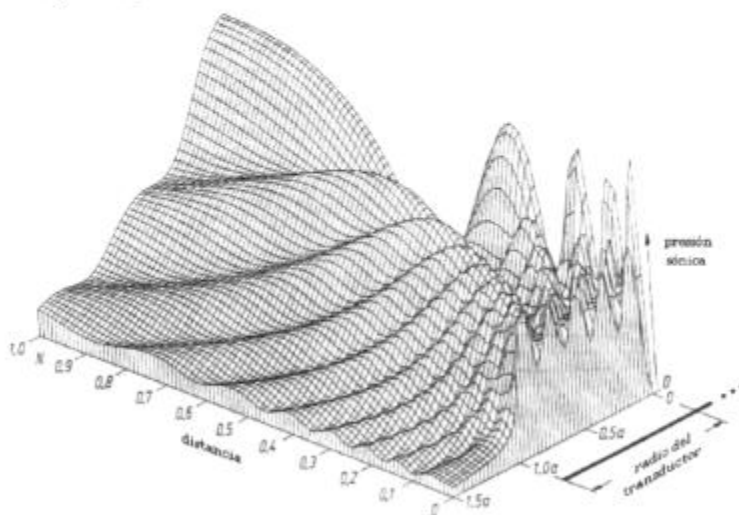


Fig. 1.14 Distribución espacial de la presión ultrasónica representada en valores lineales.

1.7 Transductores

La mayor parte de los ensayos por ultrasonido utilizan el efecto piezoeléctrico para generar y recibir las señales. El comportamiento piezoeléctrico de los materiales se debe a la ausencia de centro de simetría en la celda unitaria de su estructura cristalina que, al deformarse da lugar a la aparición de dipolos eléctricos. En la figura 1.15 se representan las posiciones de los ejes de un cristal de cuarzo natural, donde una lámina cortada perpendicularmente al eje "x" oscilará dando ondas longitudinales, mientras que para el eje "y" la oscilación será transversal [9].

Fig. 1.15 Posición de los ejes cristalográficos en un cristal de cuarzo.

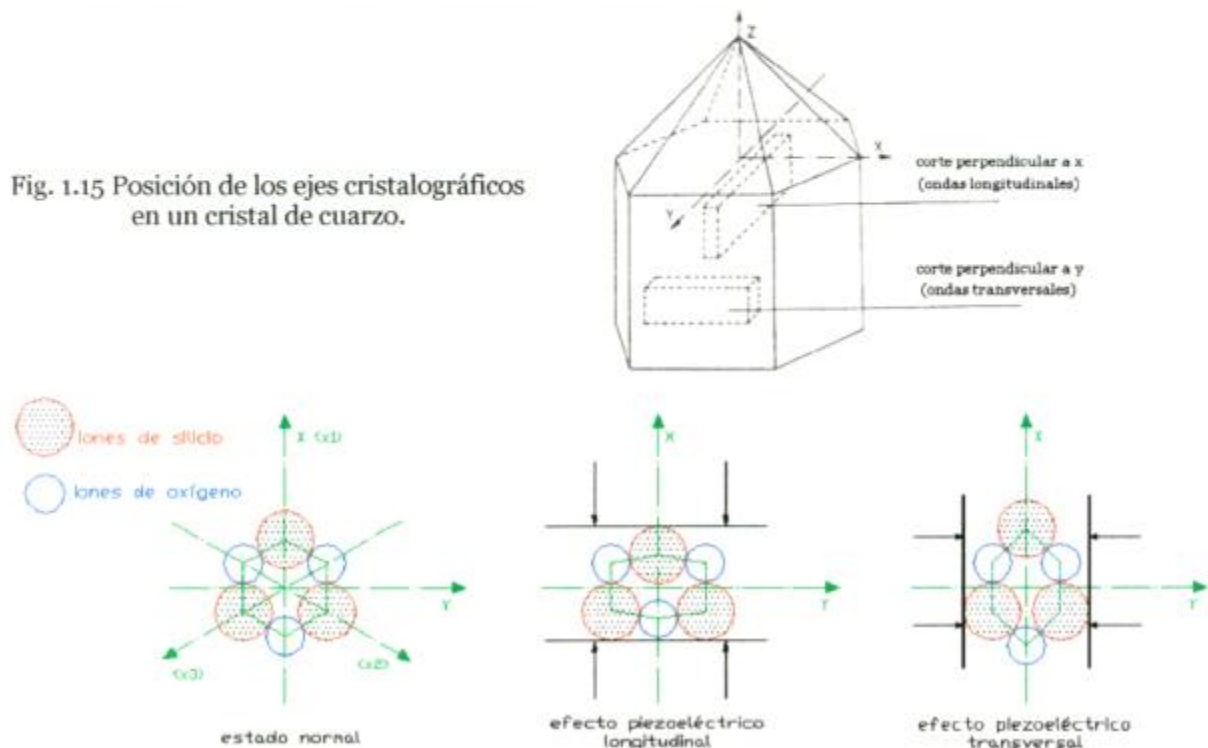


Fig. 1.16 Efecto piezoeléctrico en un cristal de cuarzo.

Al aplicar una tensión eléctrica alterna en los electrodos, el material se deforma con una frecuencia relacionada con la de alternancia de la corriente. Por lo general esta excitación se hace mediante impulsos aperiódicos de muy corta duración y se deja oscilar el cristal según su frecuencia de resonancia. Por el contrario, cuando el impulso acústico llega al cristal, este produce deformaciones que inducen una tensión eléctrica en las caras del material. Esta tensión tiene carácter alterno, igual que la deformación mecánica y su amplitud es proporcional a la energía de la onda incidente. Este proceso de compresión y expansión del cristal piezoeléctrico se puede apreciar en la figura 1.16 para el material cuarzo.

Pero actualmente la generación de ultrasonido se consigue no sólo con los materiales piezoeléctricos comunes sino con otros más recientes y con nuevas técnicas tales como:

- Materiales cerámicos.
- Materiales poliméricos.
- Materiales piezo-compuestos.
- Mediante técnicas electromagnético-acústicas (EMAT) y magnetostrictivas.
- Generación y recepción mediante láser.

Cuando el cristal se monta para construir el transductor y se acopla a un material que va a ser ensayado, el coeficiente de amortiguación δ se modifica sustancialmente. Por una parte, el palpador se construye con una masa adosada en la parte trasera del cristal con el fin de reducir la oscilación libre, es decir, de acortar el impulso. Y por otra, el propio material a ensayar ejerce una acción de frenado de la oscilación que contribuye a elevar el coeficiente real de amortiguación. En la siguiente figura se muestra tres casos en donde la amortiguación es creciente.

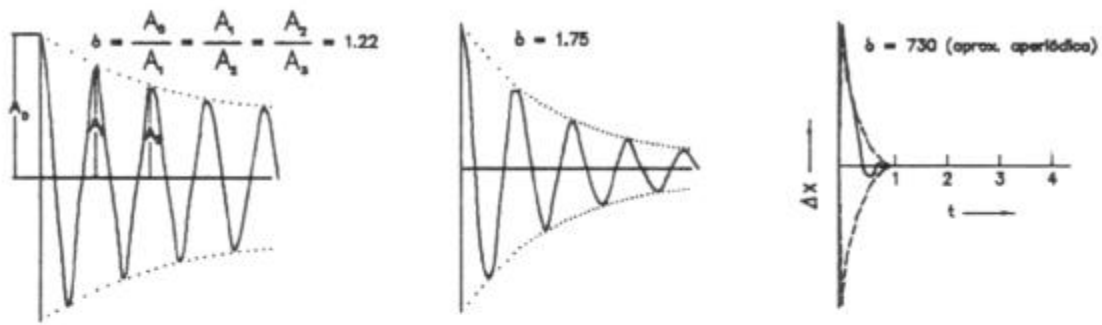


Fig. 1.17 Impulsos característicos para un coeficiente de amortiguación δ creciente.

En la ecuación 16 se expresa la relación existente entre δ con el factor mecánico o de calidad del transductor Q_m el cual expresa la relación entre la energía que se aporta en cada ciclo y la que se disipa. Tiene que ver con el poder de resolución del palpador.

$$\text{ec. 16} \quad Q_m = \frac{\pi}{\ln \delta}$$

Pero quizás esta expresión no resulta suficientemente explícita para revelar el interés de este parámetro. Por ello se suele definir el factor de calidad en función del ancho de banda del transductor:

$$\text{ec. 17} \quad W = \frac{f_u - f_l}{f_c} * 100$$

En la fórmula 17, la cantidad f_u representa la frecuencia mayor, f_l la frecuencia menor y f_c la frecuencia central tomadas a partir de la caída de 6 dB respecto de la amplitud máxima, tal como se ve en la figura 1.18.

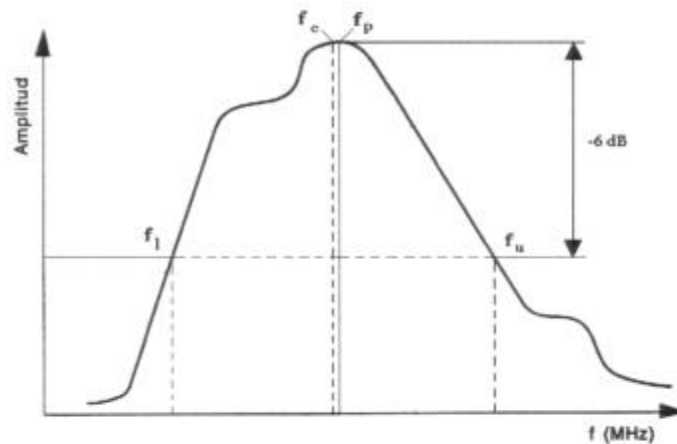


Fig. 1.18 Frecuencia de resonancia y ancho de banda.

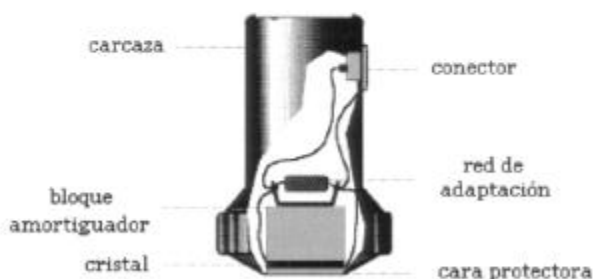
Como consecuencia de lo anteriormente expuesto, vemos que la herramienta esencial para el operador de ultrasonido es el transductor. El elemento piezoeléctrico, excitado por una descarga eléctrica extremadamente corta, transmite un pulso ultrasónico. El mismo elemento por otra parte genera una señal eléctrica cuando recibe un pulso ultrasónico la cual lo hace oscilar. El transductor es colocado en la superficie que va a ser objeto de inspección, colocando entre ambos un líquido o una pasta especial con el objetivo de que las ondas sónicas originadas en el transductor, puedan ser transmitidas a su vez hacia el objeto, de manera más eficiente. Dentro de este tipo de transductores y como veremos a continuación, su forma se adapta a cada necesidad en particular. Unicamente veremos los más importantes.

1.7.1 Transductores normales

Los palpadores cuyo haz de ultrasonido impacta perpendicularmente a la superficie de inspección son llamados transductores de haz normal. La mayoría de ellos pueden transmitir y recibir ondas longitudinales (ondas de compresión).

Existe una gran variedad de transductores [10] de haz normal, de diferentes tamaños y distintos rangos de frecuencias que van desde los 0.5 MHz hasta los 25 MHz. Con este tipo de palpadores, pueden ser alcanzadas distancias de inspección de hasta 10 m en acero para casos ideales, permitiendo el estudio de piezas de gran tamaño. El amplio rango disponible de estos sensores permite tener prácticamente uno para cada necesidad, incluso para las condiciones más difíciles. Pero, la desventaja de ellos radica en la imposibilidad de reconocer las discontinuidades que se encuentran cerca de la superficie debido al ancho del pulso inicial, situación que puede ser muy crítica en algunos casos. En la figura 1.19 se muestra un ejemplo sencillo del montaje de un transductor normal.

Fig. 1.19 Detalles de construcción de un transductor normal.



1.7.2 Transductores angulares

Los palpadores cuyo haz penetra en el material con un cierto ángulo respecto de la normal a la superficie son llamados transductores angulares (figura 1.20) ya que ellos transmiten y reciben las ondas de ultrasonido a un cierto ángulo desde la superficie de la pieza. La mayoría de ellos pueden transmitir y recibir, gracias a su diseño, ondas transversales o de corte. A manera de recordatorio cabe destacar que las ondas transversales únicamente se pueden propagar en los materiales sólidos y nunca en los líquidos o los gases ya que estos no poseen un módulo de corte.

Debido al hecho de que el material más comúnmente inspeccionado es el acero, los transductores angulares están diseñados con ciertos ángulos de incidencia que los hace aplicables en dicho material. Para realizar evaluaciones claras existen palpadores con una variedad de ángulos como por ejemplo de 35°, 45°, 60°, 70°, 80° y 90°, donde los más utilizados son los de 45°, 60° y 70°. Ahora, considerando la frecuencia, estos transductores no tienen una variedad tan grande como los normales. Esto es principalmente debido a que la alta frecuencia de las ondas transversales en los aceros no aleados y de grano fino, están sujetas a una alta atenuación, ya que la energía del sonido de las ondas que viajan a través del material es fuertemente absorbida y dispersada, haciendo que sólo se puedan inspeccionar piezas pequeñas para obtener la suficiente sensibilidad. Si las discontinuidades tuvieran que ser detectadas en grandes distancias (objetos de espesor grueso) entonces se utilizan transductores angulares con cristales de gran tamaño y bajas frecuencias.

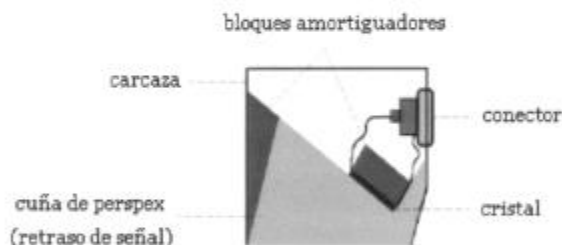


Fig. 1.20 Detalles de construcción de un transductor de haz angular.

1.7.3 Transductores duales (T/R)

Si se quisiera obtener resultados similarmente buenos como los obtenidos con los transductores normales pero con una resolución cercana a la superficie mayor, se deben utilizar los conocidos como palpadores TR o duales (figura 1.21).

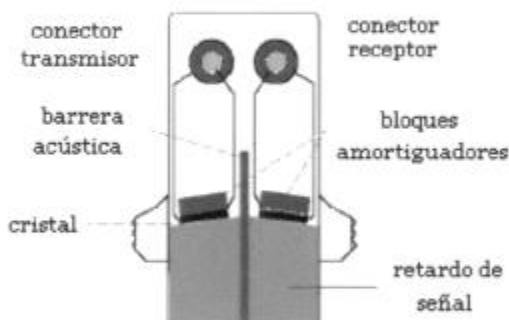


Fig. 1.21 Sección de un transductor dual.

La técnica empleada con estos transductores utiliza dos cristales los cuales están acústicamente y eléctricamente aislados uno del otro dentro de una misma carcasa. Sumado a lo anterior, ambos elementos se encuentran adheridos a un retardador de señal relativamente largo (hecho de perspex) y están ligeramente inclinados entre sí. La conexión de este palpador se realiza colocando un elemento como emisor y el otro como receptor.

Las múltiples reflexiones que ocurren dentro del material de retardo no interfieren porque el elemento transmisor no funciona como receptor. Sólo cuando los pulsos de ultrasonido provienen del componente estudiado, son captados por el elemento receptor.

La separación eléctrica y acústica, debido a razones técnicas, no es del todo completa. Especialmente cuando se emplean altas ganancias y cuando se inspeccionan componentes rugosos lo que sucede es que cierta porción de las ondas de sonido son directamente transferidas desde el transmisor al receptor. Esto genera un eco que interfiere a la señal recibida en el equipo, a esto se le llama comunicación cruzada o cross-talk. Lo anterior puede ocurrir en una pequeña región ubicada exactamente debajo del transductor y dentro del componente en estudio, dando origen otra vez a una pérdida de la sensibilidad de detección, afectando especialmente la identificación de discontinuidades pequeñas. Sin embargo, la mayoría de este tipo de señales son bastante débiles e incluso despreciables, ya que pueden ser claramente distinguidas de los ecos provenientes de la discontinuidad.

Los transductores tipo TR son por lo tanto ideales para ser empleados en la detección de discontinuidades ubicadas cerca de la superficie y para mediciones de espesor en piezas de pared delgada. Este tipo de palpadores reaccionan considerablemente con menos sensibilidad a las variaciones de acoplante que puedan ser causadas por la rugosidad y por las superficies curvadas. Dichas características explican el por qué estos palpadores TR juegan un papel muy importante en las industrias químicas y de generación de energía: son ideales para la inspección de todo tipo de tubos y contenedores, para la detección de discontinuidades en las paredes de tuberías y para la medición de la corrosión interna mediante la determinación de cambios de espesor. Algunos transductores especiales para altas temperaturas son empleados en la determinación de espesores cuyas superficies se encuentren a temperaturas cercanas a los 550 ° C, por lo que se pueden realizar inspecciones durante la operación de dichos elementos.

Los tipos de transductores mostrados constituyen la base de la gran variedad que hasta el momento se conocen. Todos los modelos emplean los mismos principios de funcionamiento y lo único que varía es su forma o disposición en los equipos manuales o automáticos. Por esta razón no entraremos en mayores detalles descriptivos, sino que en el momento que se necesite caracterizar algún tipo específico, se hará mención del mismo en la sección correspondiente.

1.7.4 Transductores para altas temperaturas y aplicaciones especiales

Los transductores comunes pueden ser utilizados dentro de un rango de temperaturas que va desde $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ sin ningún problema.

Para el caso de inspecciones prolongadas llevadas a cabo en piezas que se encuentran a altas temperaturas, existen palpadores que gracias a su diseño, pueden ser utilizados aquí. Esto se debe a que el cristal está hecho con materiales resistentes al calor, como por ejemplo:

- Metaniobatos ($300\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Polyamidas ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Materiales sinterizados ($800\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Litoniobatos ($1000\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Cristales de cuarzo ($1200\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Para realizar inspecciones en reactores nucleares es necesario emplear transductores resistentes a la radiación y además que sean resistentes a las altas temperaturas. Algunos materiales comúnmente empleados para este tipo de aplicaciones emplean pegamentos y resinas especiales.

1.8 Detección ultrasónica de discontinuidades

Los dos métodos principales de inspección por ultrasonido son los de pulso-eco y los de transmisión [11], mejor dicho son los más empleados ya que existen otros más. La diferencia principal entre ellos es que el primero se puede usar para medir amplitud y tiempo de las señales mientras que en el segundo sólo mide la amplitud. Por otro lado, la técnica de resonancia aunque llegó a alcanzar cierta extensión en las décadas del 60 y del 70, se encuentra hoy día desplazada por la de pulso-eco.

1.8.1 Técnica de pulso-eco

Como se ha mencionado, para la localización de discontinuidades se debe transmitir un pulso pequeño de ultrasonido dentro del material en estudio y medir el tiempo en el que la señal regresa hacia el transductor. Lo anterior es posible únicamente si existe un tiempo de inicio y otro de llegada bien definidos. Y además, conociendo la velocidad del sonido dentro del material, es posible el cálculo de la distancia hasta el reflector ubicándolo exactamente dentro del componente, tal y como se muestra en la figura 1.22.

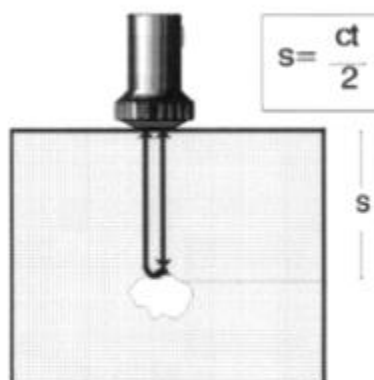


Fig. 1.22 Principio de la medición del tiempo de vuelo.

Las reflexiones dentro del rango audible son llamadas “ecos” (tal y como pasa cuando uno silba en una montaña y se escucha el eco). Y por qué no utilizar este mismo principio para la reflexión de los pulsos ultrasónicos. El tiempo de medición comienza con la transmisión del pulso eléctrico, o sea, con el pulso inicial. Esta es una descarga eléctrica extremadamente corta la cual hace que el transductor dispare un pulso de ultrasonido.

Dicho pulso viaja a través del material y es reflejado por una discontinuidad o por la pared opuesta y regresa hacia el palpador. Las oscilaciones recibidas son convertidas a su vez en pulsos eléctricos, momento en el cual se detiene el tiempo de medición. La distancia hasta el reflector puede ser determinada instantáneamente con la siguiente fórmula:

$$\text{ec. 18} \quad S = \frac{ct}{2}$$

s = distancia recorrida por el sonido [m]
 c = velocidad del sonido [m/s]
 t = tiempo de vuelo de la señal [s]

A continuación se muestra la forma en que se visualiza una señal de eco en la pantalla del equipo ultrasónico. En esta se observa que la señal de la superficie opuesta del componente recorre una mayor distancia que la proveniente de la discontinuidad, lo que produce una nueva señal hacia tiempos menores.

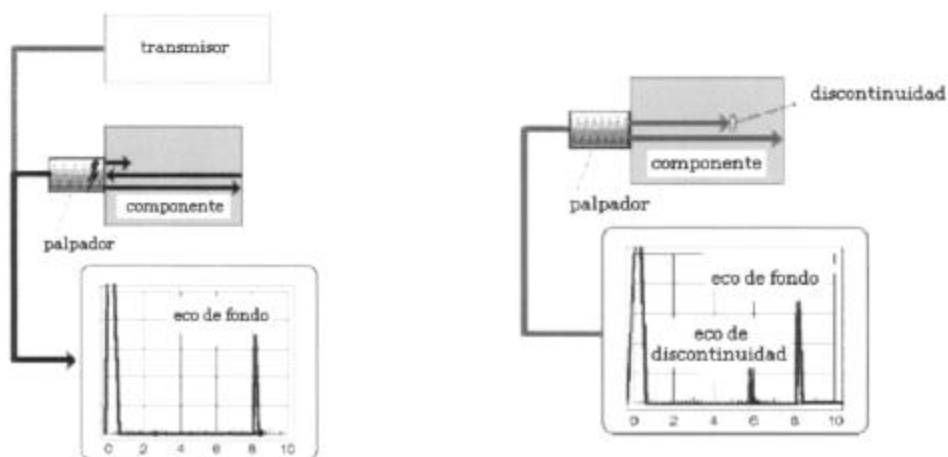


Fig. 1.23 Visualización del eco de fondo y de una discontinuidad en la pantalla del equipo.

1.8.2 Método de transmisión

También llamado de transparencia o sombra, se utilizó desde los primeros tiempos de los ensayos por ultrasonido. En la actualidad son los mismos equipos de pulso-eco los que se adaptan para trabajar en transmisión cambiando simplemente la posición del interruptor que aísla los circuitos de emisión y recepción.

Se trabaja con dos palpadores, conectados uno como emisor y otro como receptor que se sitúan a ambos lados de la muestra (figura 1.24). Cuando dichos palpadores están coaxialmente alineados y el acoplamiento en ambos es correcto, la señal en el receptor es función del estado de la muestra en esa zona. Si está libre de heterogeneidades, la amplitud será máxima mientras que irá disminuyendo a medida que el haz va siendo interceptado por discontinuidades de tamaño creciente.

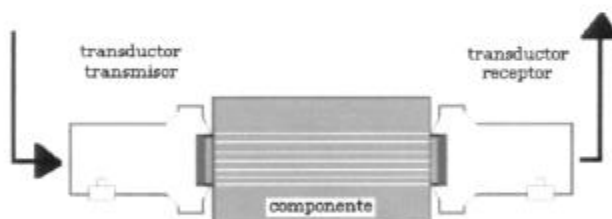


Fig. 1.24 Disposición de los palpadores en un ensayo por transmisión.

Dentro de esta misma técnica de transmisión existen varias formas de acoplar los transductores en la pieza o componente a ensayar. La forma más común es la manual (por contacto), pero con esta se pueden dar problemas de acoplamiento, no uniformidad en la perpendicularidad de los palpadores (uno respecto del otro) y la dificultad de acceso a partes de geometría complicada; unido a lo anterior es preciso destacar que esta metodología requiere de un tiempo excesivo de inspección. Otro mecanismo es el conocido como “chorro de agua” en donde los palpadores se encuentran inmersos y transmiten su señal ultrasónica a través del chorro y de la pieza. Y la tercera técnica que también tiene un empleo bastante común es la de transmisión a través de rodillos; que gracias a su disposición se pueden lograr velocidades de ensayo muy altas y de gran precisión. Existe otra modalidad de transmisión por reflexión conocida como “delta” donde ambos transductores se encuentran al mismo lado de la pieza a ensayar; en el tercer capítulo se verá con mucho más detalle.

Todas las modalidades antes descritas, hoy día son manejadas por equipos totalmente automáticos con lo cual se logran hacer una mayor cantidad de inspecciones en un tiempo muy corto, los datos adquiridos son muy precisos y además son almacenados en computadoras, y como punto extra se tiene una calidad de imagen elevada gracias a la reducción del ruido ultrasónico, como lo es el caso de los ensayos llevados a cabo mediante inmersión.

En la figura siguiente se muestran los tres tipos de modelos que caracterizan las principales técnicas de transmisión.

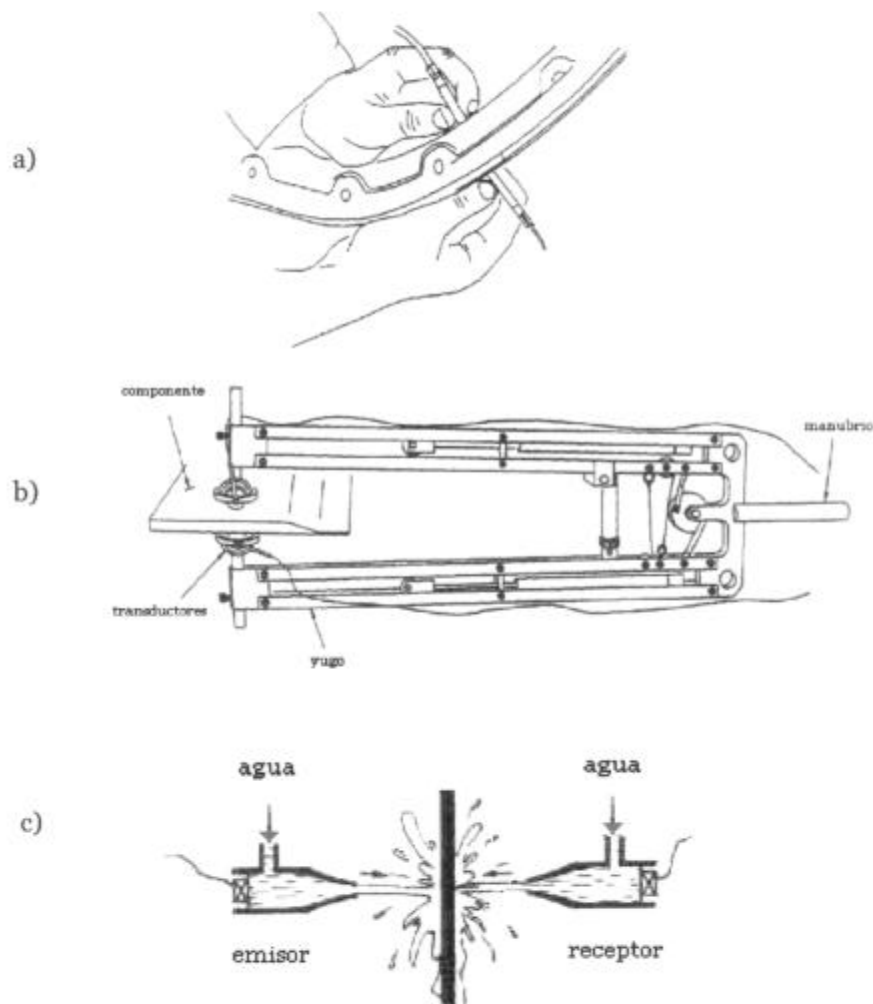


Fig. 1.25 Presentación de los tres tipos más comunes de inspección por transmisión:

- a) transmisión por contacto manual;
- b) transmisión por contacto con rodillos;
- c) transmisión por chorro de agua.

1.9 Presentación de los resultados del ensayo

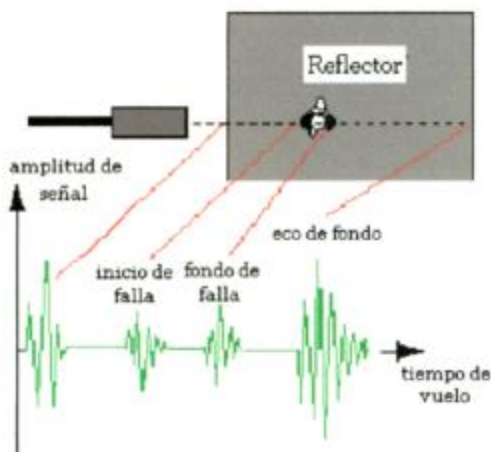
No existe una solución general que permita presentar adecuadamente los resultados de cualquier tipo de ensayo. La forma y dimensiones de la muestra, la técnica de ensayo y la secuencia de la exploración y la manera en que se realiza la evaluación son aspectos decisivos en el momento de seleccionar el tipo de presentación. Así, en la medida de espesores, es suficiente con una pantalla de tres o cuatro dígitos donde se lee directamente el espesor en mm. En ensayos de detección de defectos se utilizan cuatro formas básicas de presentación que se llaman A, B, C y D [12].

Esta forma de designar las técnicas de presentación se corresponde a la A-, B-, C- y D- scan de la literatura en inglés. La "A" procede de amplitud y la B de brillo, que son las variables características de ambas imágenes. La diferencia esencial entre ellas es que la de tipo A es exclusivamente instantánea y no aporta ninguna información acerca de la relación con los resultados del ensayo en otros puntos. Por el contrario, las de tipo B y C integran mucha información, lo que contribuye a facilitar la interpretación y evaluación de los resultados. La presentación de tipo A se obtiene sin necesidad de mover el palpador; es, por tanto, estática, mientras que las otras requieren un desplazamiento controlado del palpador y presentan, con diferentes criterios, los resultados a lo largo del recorrido del palpador. La presentación tipo A está, pues, reservada para los ensayos manuales y las otras tres para los automáticos principalmente.

1.9.1 Presentación tipo A

Es la más utilizada y da una información instantánea y unidimensional del resultado del ensayo en el punto sobre el que se está aplicando el palpador (figura 1.26).

Fig. 1.26 Presentación tipo A de la señal ultrasónica en el modo de radiofrecuencia (RF).

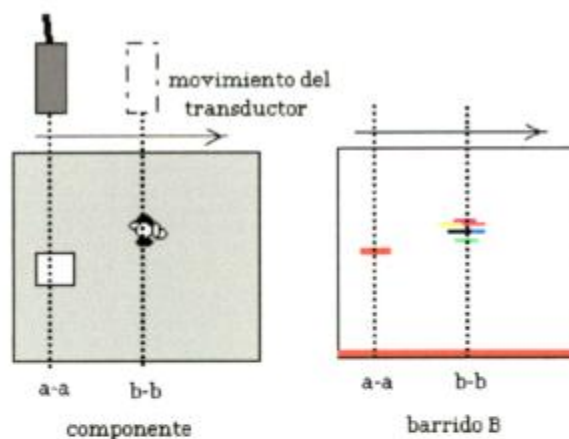


En general, se utiliza la pantalla de un osciloscopio y en ella se tiene la amplitud de la señal en función de un tiempo que es, a su vez, una medida del espesor recorrido en la muestra por el impulso acústico. Esta forma de presentación exige del operador un esfuerzo considerable de interpretación que suele ser muy compleja debido, sobre todo, a la gran cantidad de información que contiene la presentación, tal como ruido acústico y electrónico, ecos secundarios, señales procedentes de conversiones de modo, todo lo cual debe ser ignorado en muchos casos por el operador para dirigir su atención sólo hacia las señales significativas.

1.9.2 Presentación tipo B

Es una sección de la muestra por el plano en que se va moviendo el eje del haz (figura 1.27). El eje horizontal de la imagen representa la distancia recorrida por el palpador y en el vertical aparece el espesor de la muestra. La amplitud del eco se representa como una diferencia de brillo en la indicación. Esta técnica, de un uso relativamente limitado en la industria, es la más utilizada en la ecografía médica en donde se aplican equipos que operan con barrido electrónico en tiempo real, con capacidad para observar órganos en movimiento. En los equipos digitales, el brillo se puede sustituir por una escala de colores.

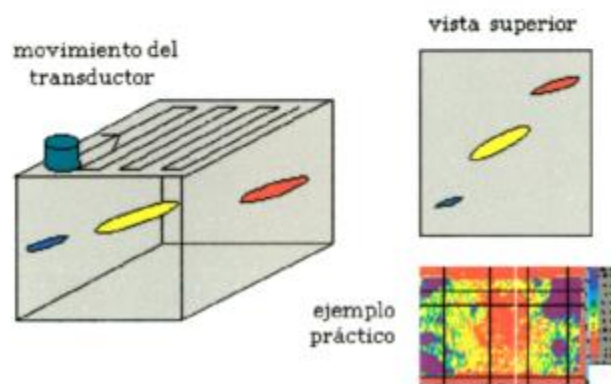
Fig. 1.27 Presentación de la señal tipo B.



1.9.3 Presentación tipo C

Ofrece una vista en planta de la muestra desde la posición del palpador que se mueve siguiendo un programa de barrido incremental que cubre toda la superficie a ensayar (figura 1.28).

Fig. 1.28 Señales tipo C provenientes de discontinuidades diferentes.

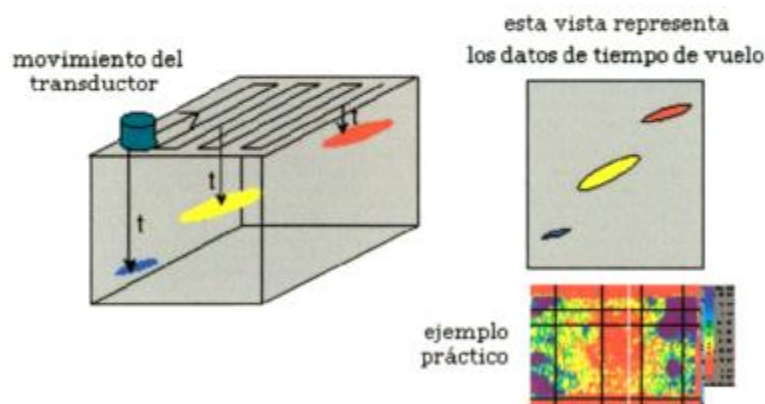


Sobre la imagen, en la que es fácil reconocer los contornos de la pieza, se registran las amplitudes de los ecos como niveles de color o de gris. Es la forma de presentar los resultados de los ensayos por transmisión, donde la amplitud de la señal es la variable que permite controlar el estado de la muestra.

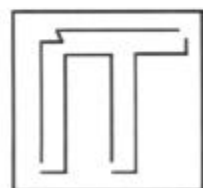
1.9.4 Presentación tipo D

Es una variante equivalente a la C pero con información de tiempo en vez de amplitud (figura 1.29). En los ensayos por pulso-eco, donde tanto la amplitud como el tiempo son variables a considerar en la evaluación, se recurre a combinaciones más o menos sofisticadas y no siempre afortunadas, ya que no es fácil recoger simultáneamente los dos tipos de información. La observación directa en la pantalla del ordenador ofrece más posibilidades, ya que se puede pasar de manera prácticamente instantánea de C a D, lo que facilita mucho la comparación.

Fig. 1.29 Presentación tipo D.



Parte II



Parte II: “Dimensionamiento de discontinuidades”

2.1 Introducción

Cada vez que encendemos un electrodoméstico, llenamos de combustible el tanque de un vehículo, cuando viajamos por tierra, mar o aire, siempre se confía directa o indirectamente en que la estructura o el equipo funcione correctamente, aún cuando este sea sometido a distintas cargas. Por ejemplo: la generación de energía eléctrica involucra el funcionamiento de calderas a altas temperaturas para obtener vapor, ya sea quemando algún tipo de combustible o por medio de una reacción nuclear; el transporte del gas a altas presiones por medio de tuberías; la producción de hidrocarburos en las refinerías; los medios de transporte modernos confían en la integridad de sus componentes sujetos a grandes y rápidas variaciones de tensiones. En todos estos campos, donde los defectos en dichos componentes pueden traer grandes pérdidas humanas y económicas, el implemento de métodos que reduzcan las probabilidades de fallas trae grandes beneficios [13].

La mayoría de los elementos están diseñados con una adecuada resistencia a las cargas que surgen en su servicio normal, o incluso en aquellas situaciones accidentales. Cuando ocurre la falla, a menudo se debe a que el componente posee defectos (normalmente fisuras) suficientemente grandes como para provocar la reducción de resistencia de dicho componente. Tales defectos tienen su origen en una manufactura defectuosa, o bien, debido a su propio entorno de trabajo como puede ser el caso de ambientes corrosivos o altas frecuencias de carga (fatiga). Para asegurar la ausencia de estas irregularidades luego de los procesos que le dieron origen o para detectarlas en servicio, existe una variedad de pruebas no destructivas que pueden ser aplicadas, de éstas los ensayos con ultrasonido son uno de los más aplicados en muchos materiales utilizados en ingeniería, aún cuando su espesor sea grande (por ejemplo, mayor a 300 mm en acero).

El tema de dimensionamiento de discontinuidades ha estado sometido a una gran cantidad de discusiones y disputas durante mucho tiempo. Su desarrollo ha sido un poco lento por el hecho de que, primero, las técnicas manuales han sido poco confiables con los resultados obtenidos; luego las especificaciones y las normas varían en contenido y complejidad, lo que tiende a confundir más que aclarar el problema. Es por lo tanto esencial evaluar las técnicas que están disponibles y fijar su mejor aplicación.

2.1.1 Necesidad de mediciones precisas del tamaño de las discontinuidades

La mecánica de fractura suministra una cuantificación original de los tres parámetros importantes siguientes:

- La tensión global aplicada sobre el componente o estructura.
- Las propiedades de resistencia a la fractura características del material.
- El tamaño de cualquier defecto presente semejante a una fisura.

Los campos de tensiones y deformaciones alrededor de los defectos pueden ser evaluados en términos de cantidades con un valor singular que representan valores críticos con respecto al inicio de la fractura. Estas singularidades críticas son llamadas “tenacidad a la fractura del material”, y tales propiedades características permiten una evaluación precisa del potencial de falla y vida útil remanente de una estructura o componente conteniendo un defecto [14].

El concepto básico empleado en mecánica de fractura es la relación entre las condiciones de carga aplicada en el cuerpo fisurado y la resistencia del material al crecimiento de fisura y fractura. La falla estructural ocurrirá si la resistencia del material a la fractura con la presencia de una fisura aguda, es menor que las condiciones tensión-deformación impuestas por las condiciones de carga y geometría. Por lo tanto, para evitar la falla, la resistencia del material debe exceder las condiciones aplicadas en el extremo de la fisura (fuerza impulsora de la fisura) y se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{resistencia del material} > \text{fuerza impulsora de la fisura}$$

La magnitud de la intensificación de las tensiones elásticas en la región del extremo de la fisura puede describirse por un término singular único K . La magnitud de K es una función de las cargas aplicadas externamente o de la tensión nominal (σ), el tamaño de la fisura (a) y la geometría de la fisura y el cuerpo. Cuando la tensión aplicada alcance un valor crítico (equivalente a la resistencia a la fractura específica del material), la fisura se hará inestable y frágil y ocurrirá fractura rápida. Este valor crítico de K se denomina K_{Ic} (tenacidad a la fractura en deformación plana) y puede ser considerado como una constante del material para una dada condición metalúrgica y bajo condiciones dadas de temperatura y velocidad de carga. Dicha cantidad puede determinarse de la siguiente manera y de ahí se puede obtener el dato de tamaño crítico de fisura a_c :

$$\text{ec. 19} \quad K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a_c} f(g)$$

K_{Ic} = factor de intensidad de tensiones crítico [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]

σ_c = tensión crítica aplicada [MPa]

a_c = tamaño crítico de fisura [m]

$f(g)$ = factor geométrico

donde

$$\text{ec. 20} \quad a_c = \frac{(K_{Ic})^2}{\sigma_c^2 \pi f(g)}$$

Las mediciones precisas de este parámetro (a_c) es por lo tanto de mucha importancia para poder asegurar la integridad estructural de muchos componentes. Una de las técnicas ultrasónicas más utilizadas para el dimensionamiento de tales discontinuidades de forma muy precisa es la llamada tiempo de vuelo de la difracción del inglés "Time-of-Flight Diffraction" (TOFD), que posteriormente se verá con más detalle. Hasta hace muy poco tiempo, las técnicas que estaban disponibles y las cuales permitían localizar las discontinuidades, tenían muy poca precisión en el dimensionado de las mismas. De esta manera, mientras que la seguridad de los componentes podía ser garantizada mediante procedimientos rigurosos de inspección, esto a menudo resultaba en reparaciones muy caras o se hacían reemplazos donde las suposiciones pesimistas eran hechas considerando el tamaño del defecto. Por otra parte, donde se llevaba a cabo inspecciones menos rigurosas, el tamaño de las discontinuidades era significativamente menospreciado. Esta situación poco satisfactoria impulsa un considerable desarrollo en el perfeccionamiento de las técnicas no destructivas, particularmente en el campo del ultrasonido. Esta técnica actualmente disponible (TOFD) tiene mucha precisión, donde en la mayoría de los casos es de $\pm 1 \text{ mm}$ o mejor y con una capacidad para mediciones dentro de un amplio rango de espesores, en materiales sometidos a grandes cargas de trabajo.

2.2 Eco de un reflector en un campo ultrasónico

Una heterogeneidad en un material (por ejemplo, una cavidad en una pieza moldeada) representa un obstáculo para una onda acústica. La presencia de esta irregularidad se pone de manifiesto por su eco cuando se emplea el método de pulso-eco o por su sombra cuando se aplica el método de transparencia o transmisión [15].

Cuando las heterogeneidades tienen una forma muy grande y regular, se pueden obtener de su eco o de su sombra suficientes datos para la determinación de sus características, basándose en conceptos geométrico-ópticos. Tal es el caso de las laminaciones en chapas o placas, en las que la onda incidente se refleja como en un espejo, dando lugar a una zona totalmente en sombra detrás de la laminación. Sin embargo, lo más frecuente es que las heterogeneidades naturales sean tan pequeñas y orientadas al azar que dan lugar a fenómenos de interferencia, tanto en el eco como en la sombra (figura 2.1). La designación de heterogeneidad pequeña no se refiere aquí, por supuesto, a la evaluación de su agresividad en relación con el efecto que pudiera causar en el comportamiento de la pieza en servicio. La comparación de tamaños se puede establecer de dos formas: una primera tomando en cuenta la longitud de onda y otra forma es comparando la discontinuidad con la sección transversal del haz ultrasónico aplicado. En este sentido se puede clasificar en tres categorías:

1ª Obstáculo muy pequeño en relación con la longitud de onda o sección del haz.

2ª Obstáculo del mismo orden de tamaño que la longitud de onda o sección del haz.

3ª Obstáculo grande en relación con la longitud de onda o sección del haz.

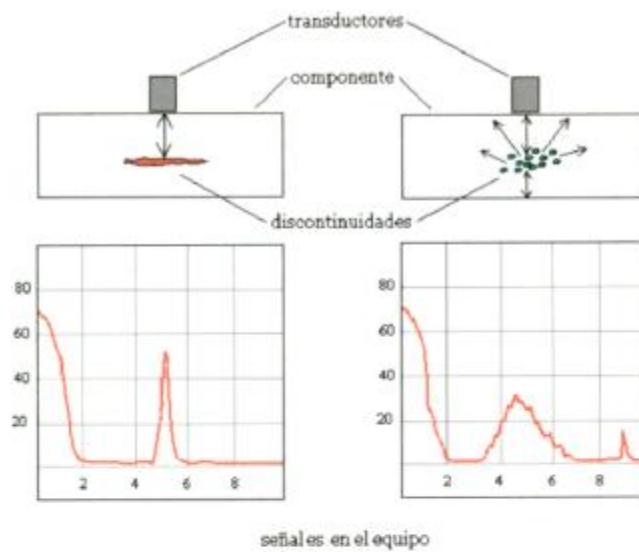


Fig. 2.1 Señal típica de una laminación comparada con discontinuidades pequeñas y distribuidas como lo puede ser un grupo de poros.

2.2.1 Criterios y técnicas para dimensionar un reflector

La determinación del tamaño del reflector es, probablemente, uno de los problemas del ensayo por ultrasonido que ha suscitado más interés por parte de los investigadores y al que se le han dedicado más recursos. Sin embargo, no se dispone de un modelo suficientemente preciso y general como para ser aplicado en los numerosos problemas industriales que lo requieren [16].

La amplitud de la señal, en alguna de sus muchas versiones, es el criterio que se sigue en la mayoría de los casos. Pero las variaciones en la cantidad y dirección de la energía acústica reflejada por una discontinuidad son enormes debido, no sólo al tamaño del defecto, sino también a su orientación, rugosidad e incluso al efecto del medio que le rodea. Por este motivo, se han desarrollado otras técnicas que tratan de evitar la dependencia de la amplitud, utilizando, por ejemplo, medidas de tiempo, mucho menos sujetas a error aunque no siempre fáciles de obtener.

No se puede, sin embargo, considerar la determinación del tamaño como un único problema. Hay ocasiones, como ocurre con las discontinuidades cuyo tamaño es mayor que la sección transversal del haz, que su dimensionado es más fácil que el caso donde se tienen defectos pequeños, los cuales no llegan a cortar totalmente el haz.

Es importante destacar que un obstáculo en un campo ultrasónico se comporta a su vez como un oscilador, es decir, puede asimilarse a un nuevo emisor de ondas, por lo que dará lugar a fenómenos de difracción, dispersión e interferencia. Ciertas características importantes pueden ser definidas en relación con este proceso; por ejemplo, en el caso de ondas planas de corte que inciden sobre un reflector como el mostrado en la figura 2.2, un análisis matemático muestra la existencia de un frente de ondas reflejadas desde una superficie planar, y de un frente de ondas difractadas desde el extremo de la discontinuidad.

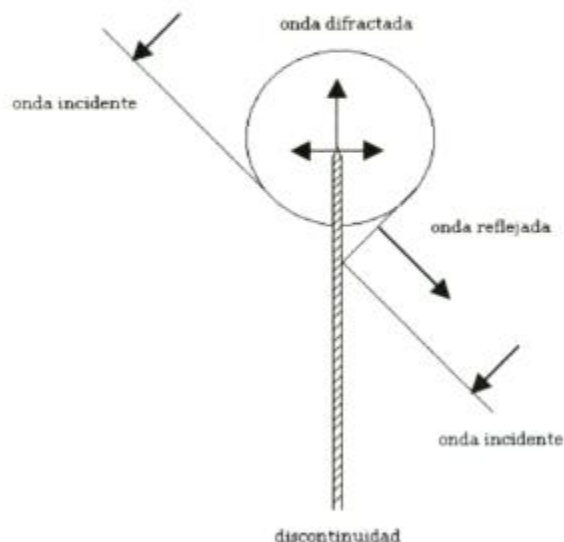


Fig. 2.2 Interacción del haz ultrasónico con una discontinuidad.

De lo anterior se pueden derivar ciertos aspectos de gran importancia, a partir de los cuales se obtienen los principios básicos del dimensionamiento de discontinuidades. Se puede citar:

- Que las ondas son reflejadas hacia el transductor con un cierto patrón de direccionalidad, tal y como ocurre con un reflector planar o un agujero de gran tamaño (reflexión especular).
- Que las ondas provenientes desde un reflector localizado, dan origen a ondas de difracción ya sea planas o esféricas.
- Que las ondas de ultrasonido que inciden sobre una discontinuidad rugosa o de superficie quebrada son dispersadas en distintas direcciones.

2.3 Métodos de dimensionamiento

Las técnicas de dimensionamiento son muchas y muy variadas, cada una aplicable a una determinada situación y necesidad en particular. Pero como se ha mencionado con anterioridad, debe existir un criterio para hacer una clasificación más exacta de los métodos existentes. En adelante se seguirá el criterio de comparación entre el tamaño propio de la discontinuidad y la sección transversal del haz y aunque existan otras formas de dimensionar reflectores, únicamente se explicarán los más empleados en el campo del ultrasonido [17].

- Caso en que las heterogeneidades tienen un tamaño mayor que la sección transversal del haz.
 - Disminución de los 6, 12 ó 20 dB empleando exploración dinámica.
- Caso en que las heterogeneidades tienen un tamaño menor que la sección transversal del haz.
 - Técnicas basadas en la medida de la amplitud.
 - Utilización de muestras patrón o de referencia.
 - Empleo de diagramas y escalas.
 - Empleo de curvas de corrección.
 - Técnicas basadas en la medida del tiempo.
 - Difracción.

2.3.1 Heterogeneidades mayores que la sección transversal del haz

Las laminaciones en chapa o los defectos de forja en grandes ejes son algunos de los casos en los que se puede encontrar este tipo de defectos. Se determina su tamaño desplazando el palpador por la superficie de la pieza, de manera que quede trazado el contorno de la proyección de la heterogeneidad sobre dicha superficie (figura 2.3). Cada punto del contorno se marca cuando el eco de fondo o el de la heterogeneidad tienen una amplitud igual a la mitad de la máxima, es decir, -6 dB. Esta técnica se suele llamar exploración dinámica, en contraste con la de exploración estática (sin movimiento del palpador) que se aplica a las heterogeneidades pequeñas, es decir, menores que la sección del haz.

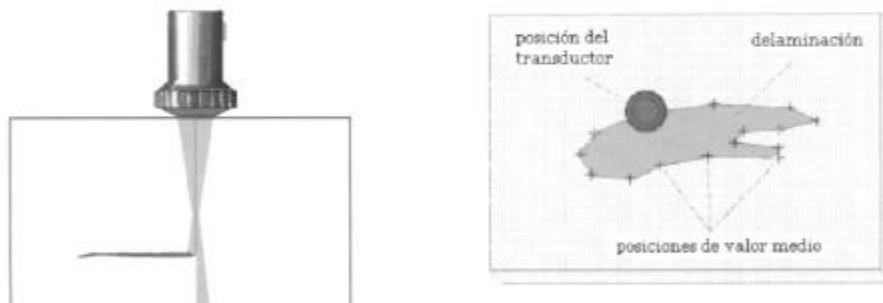


Fig. 2.3 Vistas lateral y en planta de un reflector; los puntos marcan las posiciones en las cuales la amplitud de la señal se reduce a la mitad.

En la figura 2.4 se representa la variación de las amplitudes del eco de fondo y del defecto al mover el palpador. Si la orientación es buena y la superficie no es rugosa, se tiene el caso de la figura 2.4 a, que es típico de la laminación en chapa. Si la reflectividad no es tan buena, caso de una cavidad de contracción, por ejemplo, todavía se puede estimar el tamaño observando la amplitud del eco de fondo, que seguirá siendo regular, disminuyendo a la mitad de su valor máximo cuando el eje del haz toca el borde de la heterogeneidad (fig. 2.4 b).

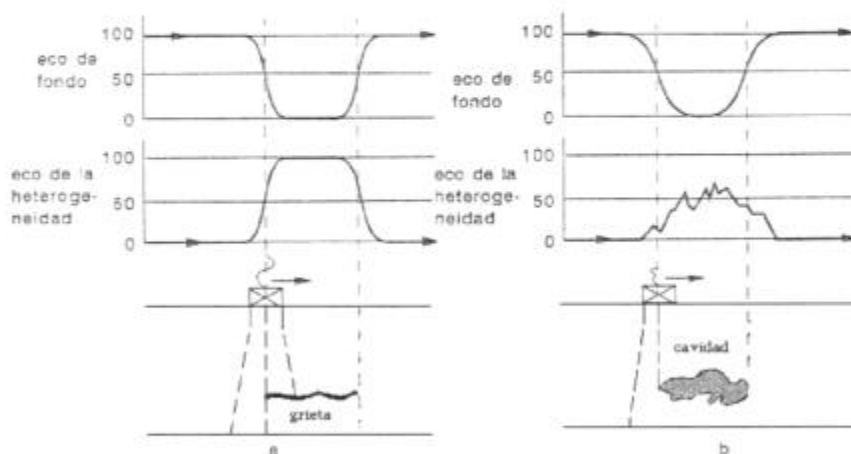


Fig. 2.4 Determinación del tamaño de una discontinuidad mediante exploración dinámica; técnica de los -6 dB.

Si no se tiene eco de fondo, una heterogeneidad plana y bien orientada no presentará problemas, ya que su eco siempre se reduciría la mitad cuando el eje del haz llegue al borde. Pero si, además, la reflectividad no es buena, la técnica de la amplitud del eco sólo servirá para determinar el tamaño de una forma aproximada, siendo necesario elegir un criterio de mínima altura del eco que señalará la presencia del borde.

La técnica de exploración dinámica se puede aplicar también a casos en los que la heterogeneidad sólo corta totalmente al haz en una dirección, es lo que ocurre con defectos alargados como puede ser una falta de penetración en soldadura.

2.3.2 Heterogeneidades menores que la sección transversal del haz

A) Técnicas basadas en la medida de la amplitud

Cuando la heterogeneidad es menor que la sección del haz se dice que es pequeña y no se le puede aplicar la exploración dinámica. Nótese que el concepto de pequeño es relativo, puesto que va ligado a la geometría del haz. Así, un reflector que puede ser pequeño para un determinado palpador, se podrá comportar como grande si por ejemplo, se utiliza un palpador focalizado.

La determinación del tamaño basada en la amplitud del eco es, probablemente, la técnica más extendida. Muchas especificaciones clasifican las heterogeneidades en significativas o no significativas poniendo como frontera, después de calibrar la ganancia con un reflector patrón, un valor de amplitud, por ejemplo 20% de la altura total de pantalla (ATP).

La determinación del tamaño se basa en la comparación de la amplitud del eco de la heterogeneidad con la del eco de un reflector conocido y obtenido en condiciones de ensayo semejantes o, mejor, idénticas. Así, si una heterogeneidad en la muestra da la misma altura de eco que el reflector de comparación o patrón, se dice que son ultrasónicamente equivalentes. Esta estimación está sujeta a grandes variaciones que son debidas, principalmente, a la orientación y forma de la heterogeneidad, a su rugosidad y al material de que puede estar rellena. En conjunto, la variación puede llegar a ser del orden de 20 dB, es decir, una relación de 10:1. Por todo ello, en aplicaciones donde el tamaño es crítico, (por ejemplo, grietas de fatiga o de corrosión en componentes de gran responsabilidad a los que hay que aplicar criterios de Mecánica de Fractura) no se recomienda basar la determinación del tamaño exclusivamente en la amplitud del eco.

El reflector de comparación puede ser de alguno de los siguientes tipos:

Tipo A: heterogeneidades naturales conocidas, de idéntica naturaleza y forma.

Tipo B: heterogeneidades artificiales, de características similares a la esperada.

Tipo C: reflectores en forma de disco circular plano.

Evidentemente, lo ideal sería disponer de probetas de comparación con reflectores del tipo A, pero esto no siempre es posible, por lo que su empleo está limitado a casos muy particulares sobre los que se ha acumulado mucha experiencia, por ejemplo, grandes series de muestras en las que sistemáticamente se presenta el mismo tipo de heterogeneidad que ha podido ser perfectamente caracterizada por otros ensayos, incluyendo los destructivos.

a) Utilización de muestras patrón o referencia

La comparación con reflectores del tipo B es muy utilizada. Tiene, entre otras ventajas, la de permitir al operador adquirir experiencia acerca del problema, lo que, frecuentemente, es decisivo para el éxito del ensayo. Se recomienda que la muestra sobre la que se mecanizan los reflectores artificiales sea una del lote a inspeccionar y, si ello no es posible, se debe asegurar que el material, estado de tratamiento y acabado superficial sean equivalentes. La expresión que se utiliza es que la muestra patrón debe ser ultrasónicamente equivalente a las que van a ser ensayadas.

La figura 2.5 muestra los tres tipos de reflector patrón usados más frecuentemente. El taladro lateral con un diámetro proporcional al espesor de la muestra (2.5 a), tiene muchas ventajas, la principal de ellas es que resulta muy fácil de reproducir. Se suelen agrupar varios taladros en la misma pieza dispuestos de forma que se puedan detectar desde diferentes distancias. La entalla superficial, (2.5 b), que puede situarse en una o en las dos superficies de la muestra patrón, se mecaniza habitualmente por fresado aunque, cuando es pequeña o la geometría es compleja, la electroerosión da buenos resultados. Por su parte, los taladros 2.5 c y 2.5 d son muy empleados en la construcción de las curvas o diagramas especiales, como se verá en el siguiente apartado.

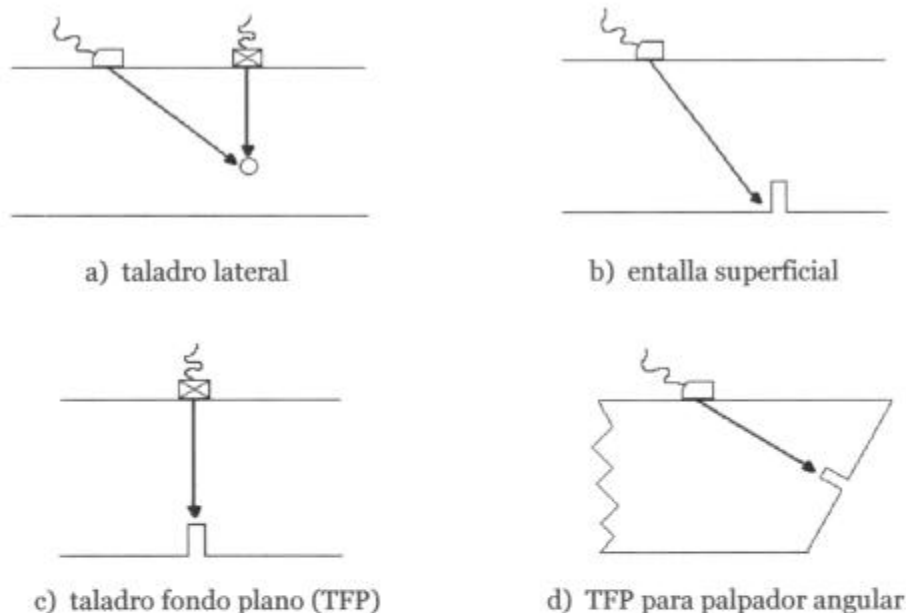


Fig. 2.5 Disposición de los reflectores patrón.

Es fundamental que el reflector seleccionado como patrón sea fácilmente reproducible, ya que, en muchos casos, será utilizado tanto por el fabricante como por el cliente y los resultados deben ser equivalentes. Además, debe ser fácil la comprobación de su orientación y dimensiones en casos de discrepancia o, simplemente, a efectos de la documentación del ensayo exigida por el Sistema de Calidad.

b) Empleo de diagramas y escalas

La comparación con un reflector del tipo C se ha venido haciendo de dos formas diferentes:

- Con TFP reales mecanizados con gran precisión en bloques de diferentes materiales de acuerdo con la norma ASTM E-127.
- Mediante técnicas basadas en el modelo de comportamiento de un reflector circular, plano, orientado perpendicularmente al haz (diagrama DAT=distancia-amplitud-tamaño; o en inglés DGS=distance-gain-size).

Una discontinuidad que esté contenida completamente dentro del haz ultrasónico es considerada como un reflector pequeño. Si dicho reflector es evaluado de la forma antes descrita, obtendríamos una medición distinta a la verdadera y por lo tanto el método empleado no es práctico en este caso. Además, sabemos que la altura del eco de un reflector será mayor cuanto más grande sea el área del haz ultrasónico que lo enfoca. Este posible comportamiento puede ser utilizado en reflectores pequeños ya que la altura de sus ecos se incrementan con sus áreas. En la figura siguiente se representa lo antes mencionado.

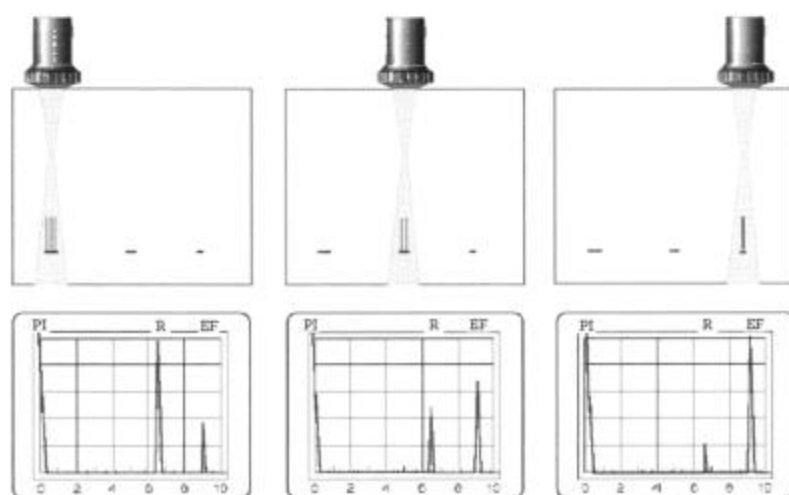


Fig. 2.6 Reflectores con diferentes áreas y sus ecos correspondientes.

Bajo óptimas condiciones, haciendo agujeros de fondo plano y a igual profundidad, la siguiente ley puede ser confirmada: "la altura del eco es proporcional a su área, o bien, la altura del eco es proporcional al cuadrado de su diámetro". De todas formas, si los ecos provenientes de dos agujeros ubicados a diferentes profundidades son comparados, siempre surge una dependencia de la altura de los ecos con la distancia del reflector.

Con pruebas precisas utilizando agujeros de fondo plano a diferentes profundidades, se puede deducir una ley muy simple, al menos para ser aplicada en el campo lejano del haz ultrasónico: "la intensidad acústica es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia ó profundidad del reflector". Esto normalmente no es aplicado en el campo cercano del haz. Para este caso, los resultados de las pruebas muestran que la altura del eco en el foco alcanza su máxima amplitud y de nuevo se ve reducida a una distancia menor, como se muestra en la siguiente figura.

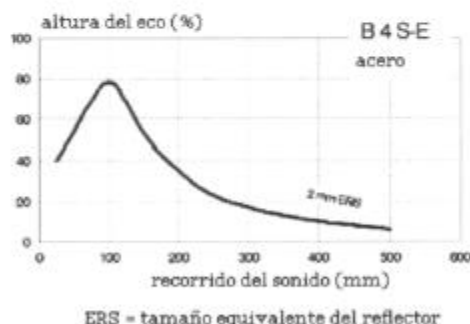


Fig. 2.7 Curva DAT correspondiente a un reflector tipo disco de 2mm.

Si curvas como la anterior son colocadas en un formato tipo escala transparente en la pantalla del equipo, podremos tener inmediatamente la posibilidad de evaluar comparativamente los ecos de reflectores desconocidos y los conocidos; así por ejemplo, la altura de un eco de una discontinuidad es comparada con la de un disco o agujero de fondo plano. Debido al hecho de que solamente se valora el sonido reflejado desde la discontinuidad es que no debemos decir que esta tiene un tamaño exacto, sino que se debe referir a ella con un tamaño equivalente. Por lo tanto, el tamaño equivalente de una discontinuidad sólo corresponde al tamaño verdadero de dicho reflector en los casos idealizados. En la práctica esto casi nunca ocurre, lo que significa que el verdadero tamaño de la discontinuidad es normalmente mayor que su tamaño equivalente. De lo anterior no se puede derivar una ley porque la altura del eco es fuertemente dependiente de las características de la discontinuidad, en otras palabras de su geometría, orientación respecto del haz ultrasónico y de la calidad de la superficie estudiada.

c) Empleo de curvas de corrección

Cuando se tiene una pieza patrón con un reflector de comparación de tipo B, es posible trazar, sobre la pantalla del equipo, una curva o serie de curvas que son el lugar geométrico de los picos de los ecos del reflector detectado a diferentes distancias. La curva obtenida (figura 2.8) es llamada comúnmente DAC del inglés "distance-amplitude-correction". Cuando es detectada una discontinuidad, lo que se hace es observar si el eco supera o no la curva DAC y de acuerdo a un determinado criterio, se estima la dimensión en forma aproximada. Además, una determinación es hecha mediante un cambio en la ganancia correspondiente permitiendo ver por cuántos decibeles un eco se excede de la curva. Este exceso en la altura del eco es la medida reproducible para la evaluación y el reporte de la discontinuidad. Las ventajas que se obtienen con la utilización de la curva DAC son:

- No es necesario comparar cada eco de la discontinuidad con el eco de la referencia correspondiente del bloque patrón sino que la evaluación se hace directamente con la curva DAC.
- Cada curva va asociada al palpador con el que se ha construido, lo que elimina los errores debidos a las diferencias de comportamiento entre palpadores.
- El archivo de una curva DAC utilizable en ciertas aplicaciones sólo es necesario hacerlo una vez, ya que la curva se puede guardar en la memoria del equipo.

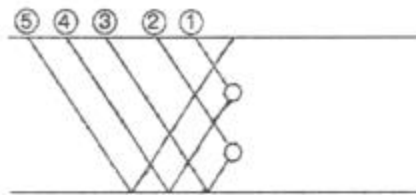
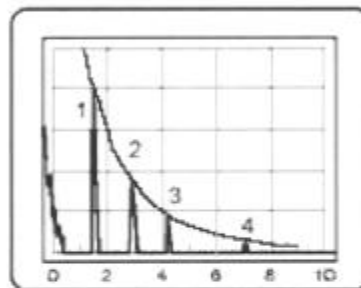


Fig. 2.8 Construcción de una curva de corrección distancia-amplitud.



Mediante el archivo de la curva hecha utilizando reflectores ubicados en el bloque patrón comparables con los de una pieza real, dicha curva contiene todas las influencias del bloque empleado (ley de distancias, atenuación del sonido, pérdidas superficiales). Las correcciones correspondientes no son del todo necesarias. Una vez obtenidos los resultados de la evaluación, debemos tener en consideración que el efecto de la discontinuidad (geometría, orientación y acabado superficial) no están tomados en cuenta, situación parecida a la evaluación utilizando el método DAT descrito con anterioridad. Por lo tanto ambos métodos presentan cierta incertidumbre en lo que se refiere al dimensionamiento de dichas discontinuidades.

B) Técnicas basadas en la medida del tiempo

Como se ha visto, además de obtenerse una máxima amplitud del eco cuando la reflexión en un reflector bien orientado es especular, se produce también la difracción en los bordes que da lugar a un eco o ecos satélites. El conjunto de técnicas que se basan en esta idea se conoce como TOFD (Time-of-Flight Diffraction), como se ha mencionado con anterioridad.

La amplitud de los ecos producidos por difracción en un borde es bastante baja si se compara con la reflexión especular, lo cual exige mantener una relación señal-ruido alta, para que se puedan detectar y utilizar para medir el reflector.

Para la detección de los ecos de borde es conveniente utilizar palpadores focalizados que concentran mucha presión acústica en la zona de interés. Además, por su mejor resolución lateral, es más fácil detectar separadamente los ecos procedentes de bordes próximos en los defectos pequeños. Se puede trabajar con palpadores de incidencia normal o angular. En ninguno de los dos casos mencionados se tendrá reflexión especular, por lo que el riesgo de enmascaramiento de los pequeños ecos de difracción es menor. De esa forma se determina, al mismo tiempo, el tamaño y la orientación de la heterogeneidad. En ambos casos, la precisión es alta, generalmente dentro de ± 1 mm o superior, aunque esto es difícil de lograr en ensayo manual. El dato adicional de desplazamiento del palpador, entre los puntos en los que se ha detectado el máximo de los ecos de difracción, se puede utilizar para contrastar con el obtenido de los tiempos de vuelo del impulso y comprobar que existe entre ellos la adecuada coherencia geométrica.

Cuando existe riesgo de que el eco de difracción coincida con alguna reflexión especular, se recurre a la exploración con dos palpadores angulares, también llamada técnica en delta (figura 2.9).

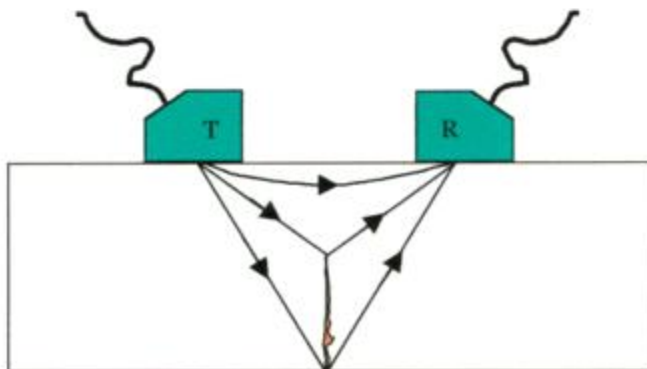


Fig. 2.9 Técnica de barrido tipo delta.

2.4 Factores que influyen en el dimensionamiento de discontinuidades

Resumiendo todo lo dicho anteriormente, se puede decir que los ensayos llevados a cabo para el dimensionamiento de discontinuidades, se ven afectados por los siguientes factores, que a su vez son los más comunes y con los que un operador de ultrasonido debe estar bien familiarizado [18].

2.4.1 Tamaño de la discontinuidad

Las discontinuidades que se consideran de mayor dificultad para ser localizadas y medidas son aquellas cuyo tamaño es menor que la sección transversal del haz ultrasónico. Lo anterior ocurre principalmente por el enmascaramiento que sufren las señales del reflector debido a otras reflexiones especulares de mayor intensidad (que pueden ser propias de la geometría de la pieza) o por los cambios de modo que puedan ocurrir. Por lo tanto, la mayoría de las técnicas antes descritas no ofrecen la exactitud y confiabilidad de dimensionado requerida en muchos casos.

2.4.2 Rugosidad de la discontinuidad

Ya sea uniforme o irregular, una superficie rugosa tiene el potencial para presentar un efecto de dispersión en la interface donde incide el haz de ultrasonido. El grado de dispersión esta basado en la relación entre la rugosidad y la longitud de onda. Cuando la rugosidad es aproximadamente menor que 0.1 veces λ , la dispersión será despreciable; para reducir las pérdidas de señales debido a este efecto, el operador puede seleccionar un transductor de baja frecuencia. Por ejemplo, con una longitud de onda de 0.37 mm en agua para un palpador de 4MHz, la pérdida de señal debido a la dispersión puede ocurrir para irregularidades de un tamaño aproximado a los 0.04 mm. Además de la reducción de señal, otro efecto de las irregularidades superficiales es remitido al cambio de modo de la energía cuando el pulso regresa al palpador, lo cual puede ser la fuente de señales erróneas.

2.4.3 Orientación de la discontinuidad

La interacción entre las ondas de ultrasonido y el reflector no siempre tiene lugar de una manera ideal. En la mayoría de los casos una porción del haz incide sobre el reflector y a veces sólo una pequeña parte de las ondas reflejadas puede recibirse. También es posible que la conversión de modo tome lugar y el tipo de onda recibido sea diferente del pulso transmitido. Por consiguiente, al usar métodos de evaluación simples, las muchas posibilidades de interacción a veces llevan a un incierto o incluso un mal resultado. Sin embargo, lo opuesto también puede ser verdad: si el tipo y posición de un posible reflector son conocidos, entonces estos métodos de evaluación simples pueden dar también resultados buenos como los obtenidos con los métodos analíticos más sofisticados.

2.5 Características del transductor

Otro de los factores que influye sobre la precisión y exactitud con que se detectan y miden discontinuidades son los transductores. Dependiendo de las características del mismo, se podrán o no realizar las mediciones deseadas. Por lo tanto, el funcionamiento de los transductores se debe verificar y supervisar constantemente. Los códigos y normas proveen los parámetros que se necesitan comprobar en el instrumento y en general de todo el sistema. Pero además de asegurar que estos aspectos se encuentran dentro de tolerancias permitidas en un inicio, se deben vigilar regularmente para asegurar que ningún cambio significativo ocurra durante su vida útil [19]. Algunas de las características más importantes de los transductores se citan a continuación.

2.5.1 Frecuencia central

Coincide, en general, con la frecuencia nominal del transductor aunque pueda variar dependiendo de sus características constructivas. Se corresponde con el máximo del espectro de frecuencias del eco de un reflector especular perpendicular al eje del haz y suficientemente grande para que no influya la difracción.

2.5.2 Ancho de banda

Un palpador no emite únicamente impulsos de frecuencia igual a la nominal, sino dentro de un rango que se llama ancho de banda. Cuanto más corto es el impulso mayor es el ancho de banda. En la figura 2.10 se presentan algunos ejemplos particulares.

Como regla general, interesa que un palpador genere pulsos cortos. De esa forma, se puede tener más información acerca del reflector, ya que podrá estudiarse el comportamiento de las diferentes frecuencias. Además, si el pulso es más corto, mejora el poder de resolución, es decir, la capacidad para separar reflectores próximos. Como contrapartida, se requiere fuerte amortiguación, con lo cual el rendimiento del palpador baja, es decir, tiende a dar ecos de menor amplitud y una relación señal-ruido también menor. En palpadores destinados a ensayos por transmisión, donde la longitud del impulso no es relevante, se puede prescindir del amortiguador para obtener el máximo rendimiento en cuanto a amplitud de la señal.

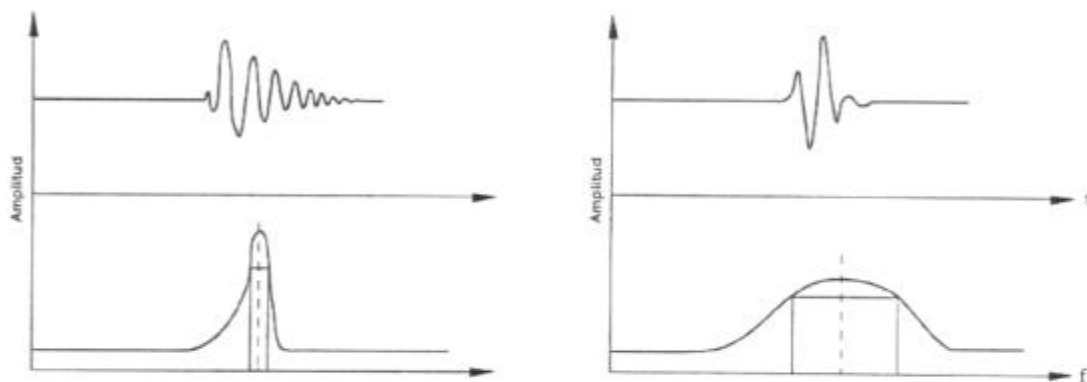


Fig. 2.10 Relación entre la longitud del impulso y el ancho de banda de un palpador.

2.5.3 Poder de resolución

Estrictamente hablando, debería denominarse poder de resolución axial, para distinguirlo del poder de resolución lateral. El primero es el que define la capacidad de un palpador para detectar con ecos separados dos reflectores situados a diferente profundidad.

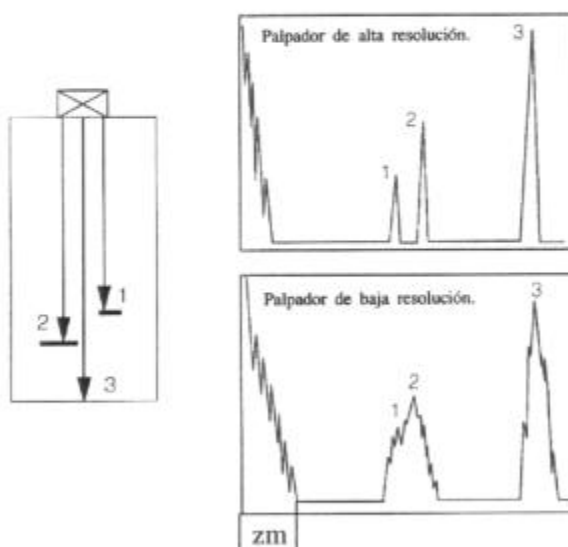
La resolución axial (figura 2.11) está directamente relacionada con la longitud del pulso y, por tanto, con el ancho de banda del palpador. Decir que un palpador es de pulsos cortos es equivalente a identificarlo como de banda ancha o de buen poder de resolución.

La resolución lateral (figura 2.12) expresa la capacidad del palpador de detectar independientemente dos reflectores próximos situados a la misma distancia axial del palpador. Depende, por tanto, de las dimensiones del haz a la altura de los reflectores.

La resolución lateral, más que con el impulso, está relacionada con la geometría del haz, especialmente con la focalización. Un palpador focalizado (como por ejemplo los transductores duales) tiene una resolución lateral muy mejorada si se compara con el mismo palpador sin focalizar. Pero eso es cierto con la condición de que la determinación se haga en la zona focal ya que fuera del foco, sobre todo a distancias mayores, la resolución lateral de un palpador focalizado se deteriora rápidamente por el rápido incremento del ancho del haz.

Es necesario agregar en esta parte que la zona muerta (zm) del transductor situada inmediatamente después de la cara protectora del mismo, se forma como consecuencia de la oscilación del cristal después de haber cesado la excitación eléctrica.

Fig. 2.11 Dos ejemplos del poder de resolución axial.



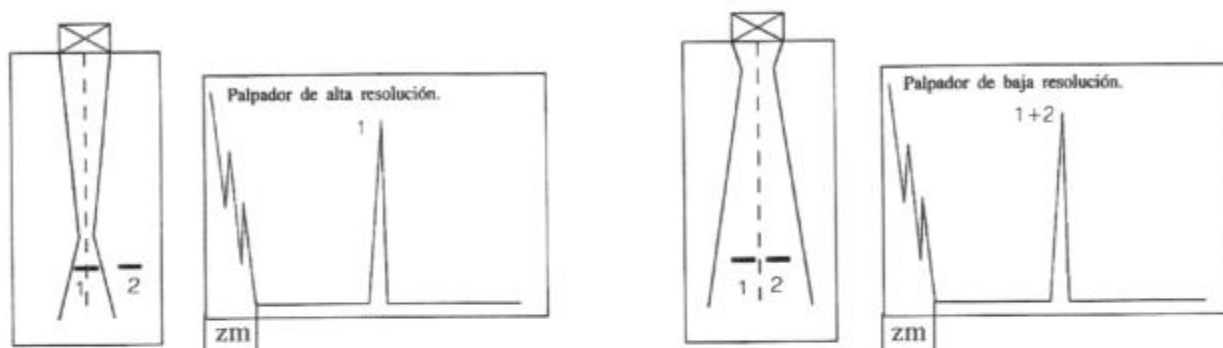


Fig. 2.12 Dos ejemplos del poder de resolución lateral.

2.5.4 Ensayos de caracterización de transductores

Es relativamente frecuente que palpadores nominalmente idénticos se comporten en la práctica de forma bastante diferente. Esto puede suceder no sólo como consecuencia de procesos de envejecimiento de palpadores en uso, sino también en palpadores nuevos. Tales diferencias, que pueden relacionarse con la frecuencia, sensibilidad o resolución, se traducen en respuestas diferentes frente a reflectores idénticos.

La mayor parte de la responsabilidad de estas variaciones hay que buscarla en la unión entre el amortiguador y el cristal, concretamente en el espesor del adhesivo. Para la mayoría de las aplicaciones es suficiente que el espesor del adhesivo sea $\lambda/100$, pero en palpadores de banda ancha ese límite debe ponerse en $\lambda/200$.

La persistencia de este problema, bien conocido por fabricantes y usuarios desde hace años contrasta con el hecho de que no se haya emitido una normativa internacionalmente aceptada para caracterizar un palpador, es decir, para medir sus características de una forma objetiva y reproducible. Actualmente existen escasas normas para la caracterización de transductores ultrasónicos, dicha evaluación es de suma importancia principalmente en el sector aeronáutico y nuclear, en donde se inspeccionan muchos componentes cuyo fallo en servicio sería catastrófico.

A continuación se recogen los criterios básicos que deberían incluirse en una norma de caracterización de palpadores. La instrumentación debe estar perfectamente definida. Esto es de suma importancia ya que, como es bien conocido, un mismo palpador se comporta de manera diferente dependiendo de la electrónica que se le asocie. En particular, es necesario especificar:

- Impulso de excitación.
- Ancho de banda del amplificador.
- Naturaleza y tamaño del reflector.
- Características acústicas del medio de acoplamiento.
- Características acústicas de la muestra.
- Tipo y longitud de los cables, conectores y accesorios.

Ninguno de estos factores es despreciable y, dada la enorme variedad de la instrumentación disponible, es muy difícil que se pueda garantizar la igualdad de los resultados. Esto, que es totalmente cierto para la instrumentación analógica, quizá pueda ser mejorado al aplicar todos los recursos de la instrumentación digital, en la que los parámetros de ensayo son fácilmente almacenados y reutilizados en cualquier momento.

Igualmente importante es definir la técnica de ensayo (contacto o inmersión) que se utilizará para cada palpador o grupo de ellos. En general, será preferible trabajar por inmersión para tener más asegurada la constancia de las condiciones de acoplamiento.

Los parámetros del palpador cuya determinación debe estar regulada en la especificación son los siguientes:

Forma y amplitud del pulso: fotografía o registro en papel del eco máximo del reflector patrón obtenido en condiciones de distancia definidas.

Frecuencia central y ancho de banda: se obtiene haciendo el análisis espectral del eco de referencia. Actualmente lo normal es tener el eco en forma digital y se le aplica la transformación de Fourier (FFT).

Presión acústica: (campo cercano): la variación de la amplitud del eco de un reflector a lo largo del eje del haz permite determinar la distancia a la que se encuentra el máximo, que coincide con el campo cercano.

Secciones del haz: una sección longitudinal por un plano que pase por el eje del haz permite evaluar los lóbulos laterales y su grado de simetría. Una sección transversal puede detectar fallas en el piezoelectrico o defectos en el pegado de la capa de adaptación.

Código del producto = 113-224-591
Número de serie = OOKJXM
Descripción = MSWQC, 5 MHz
Objetivo de ensayo = 0.375" plexiglass
Impedancia = 250 Ohms
Sensibilidad = -23.00 dB
Duración del pulso @ -20dB = 5.07E-07
Frecuencia pico = 4.64E+06 Hz
Frecuencia central = 4.39E+06 Hz
Ancho de banda @ -6dB = 88.0 %

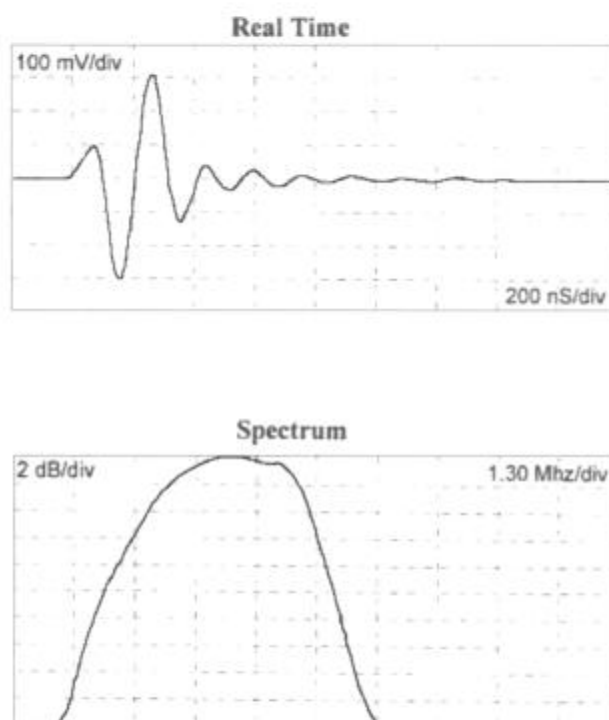
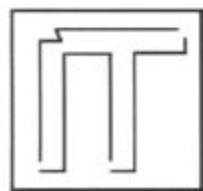


Fig. 2.13 Ejemplo de una certificación de un transductor hecha por el fabricante.

Parte III



Parte III: “Tiempo de vuelo de la difracción”

3.1 Introducción

La técnica de tiempo de vuelo de la difracción o del inglés “time of flight diffraction” (TOFD) fue desarrollada en el National NDT Centre, Harwell Inglaterra, por el doctor Maurice Silk en el año 1974. Pero en los últimos 10 años es que ha recibido un impulso muy fuerte en su desarrollo, especialmente en laboratorios donde se tratan de detectar y dimensionar defectos en componentes que van desde un espesor de 1 mm hasta los 250 mm o más que pueden tener los recipientes de los reactores nucleares [20]. Debe reiterarse quizás primero que la TOFD es una técnica ultrasónica y, que como tal, es gobernada esencialmente por las mismas leyes físicas que se aplican a los métodos de reflectividad establecidos y que está por consiguiente sujeta a muchas de las mismas limitaciones.

La única diferencia de la técnica TOFD respecto de los otros métodos basados en ultrasonido, es que esta se basa en la detección de señales difractadas más que en señales reflejadas. En lugar de controlar la respuesta en amplitud de la energía reflejada y utilizando esto para hacer una valoración comparativa del tamaño equivalente del defecto, la TOFD se basa en la detección de amplitudes relativamente bajas de las señales difractadas en los bordes de la discontinuidad. Capturando estas señales y procesándolas, se puede identificar la presencia y situación de defectos ubicándolos con gran precisión con respecto a la geometría del componente bajo ensayo. Además, tal y como ocurre con los ensayos convencionales de ultrasonido, la mayor parte de la energía transmitida se pierde por los efectos de absorción y dispersión provocados por el material bajo estudio, lo que hace más complejo el estudio de este tipo de señales.

3.2 Interacción haz de ultrasonido-discontinuidad

Es comparativamente fácil describir en términos cualitativos, la interacción de un frente de ondas de ultrasonido con una discontinuidad en particular y sus alrededores [21]. En primer lugar es conveniente omitir cualquier cambio de modo que pueda ocurrir y segundo tener en cuenta la siguiente figura:

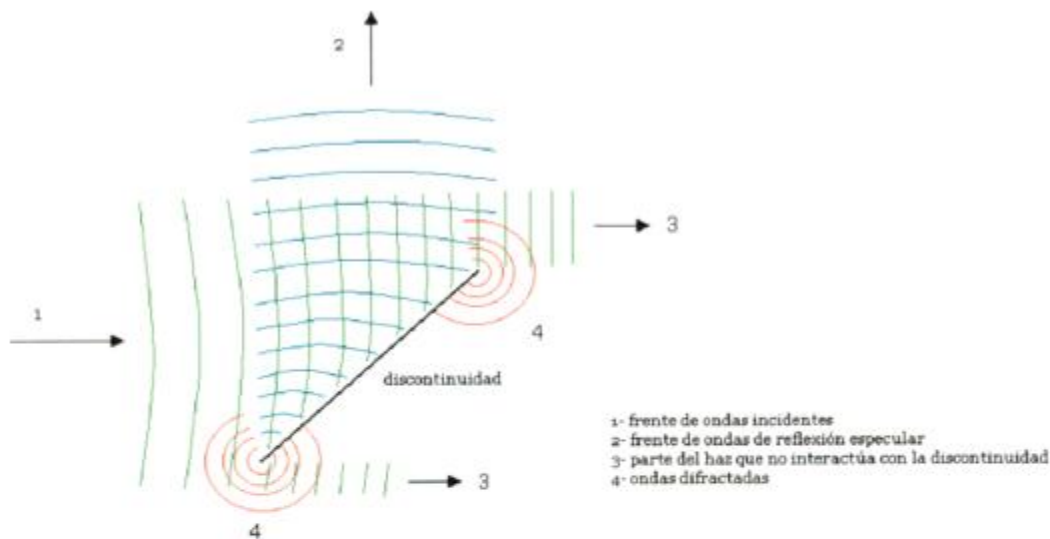


Fig. 3.1 Interacción de un frente de ondas con una discontinuidad.

Como resultado de la interacción del frente de ondas de ultrasonido con la discontinuidad se observan tres fuentes principales de energía reirradiada. Primero existe una reflexión especular proveniente de la superficie de la discontinuidad la cual obedece a las leyes normales de la reflexión. Una segunda serie de reflexiones arriban desde la superficie rugosa de la discontinuidad dando como resultado una fuente de radiación dispersa. Y finalmente, un tipo de ondas que son emitidas desde los bordes de la discontinuidad las cuales son debidas a la difracción que sufre el haz de ultrasonido al pasar por dicho obstáculo.

La proporción de energía que es transferida en los diversos modos varía en función del ángulo de incidencia y esto ha sido calculado para incidencia unidireccional en un medio semi-infinito. Factores tales como la divergencia del haz y la dispersión desde una superficie rugosa aseguran un amplio rango de cambios de modo. Problemas particulares de este tipo pueden ser por ejemplo las ondas superficiales las cuales viajan a lo largo de la discontinuidad siendo reconvertidas a su modo original en los bordes de la misma, otro puede ser el cambio de modo que tiene lugar en los sitios de difracción. Lo anterior puede causar retrasos en los ecos los cuales pueden estar separados espacialmente por dimensiones similares a las de la discontinuidad estudiada. Otro fenómeno problemático que puede darse es el cambio de modo de una onda longitudinal a transversal o viceversa, dando origen a la aparición de ecos anteriores a los de interés lo que causa gran distorsión.

Las razones del limitado éxito en los cálculos cuantitativos de la interacción del haz de ultrasonido con la discontinuidad no radica en la complejidad de los cálculos sino que hay dos razones principales. La primera de ellas es el gran número de modos de vibración ultrasónica posibles y el número de conversiones y reconversiones que existen dentro de la pieza estudiada, lo que puede originar reflexiones complejas incluso en geometrías sencillas. Un segundo factor surge del tratamiento matemático de esas interacciones. La mayoría de los cálculos llevados a cabo desafortunadamente son equivalentes a la suposición de que el radio de curvatura proyectado en el objeto es grande comparado con la longitud de onda empleada. Esto no sucede en muchos casos prácticos en donde existen fisuras u otras discontinuidades similares. Sin embargo, para proveer cálculos rigurosos acerca de la interacción del ultrasonido con las discontinuidades cuya forma sea arbitraria, se requiere una descripción más generalizada del proceso que permita una mejor aproximación.

La técnica TOFD ha ido ganando rápidamente una gran importancia como método de inspección ya que puede detectar y dimensionar discontinuidades simultáneamente. Rutinariamente se emplea en un rango muy amplio de aplicaciones tales como inspecciones en recipientes a presión, inspección de soldaduras y en el estudio de componentes de alta responsabilidad operacional. En un ensayo normal realizado con esta técnica se puede obtener información como la que se indica a continuación:

- Ubicación de indicaciones a lo largo del componente.
- Posicionamiento de las indicaciones respecto de la superficie de barrido (profundidad).
- Extensión de la discontinuidad.
- Información acerca del tipo de defecto.

Esto, en combinación con la alta probabilidad de detección y la baja proporción de señales falsas, hacen de la TOFD una herramienta muy importante dentro de los ensayos no destructivos, en el sentido de que la buena habilidad de evaluación se apoya en las consideraciones de la mecánica de la fractura. Recientes desarrollos de códigos y normas de aceptación de defectos para el uso de esta técnica, han dado como resultado una mayor aceptación de ésta cada año, un aumento creciente dentro del mercado y algunas de las mayores ventajas es que se ha promovido:

- El perfeccionamiento de los equipos.
- El perfeccionamiento en el desempeño de transductores.
- Las iniciativas de establecer operadores calificados en dicha técnica.
- La aceptación de la TOFD en la inspección de soldaduras y recipientes.
- La implementación de nuevos códigos y normas.

3.3 El proceso de difracción

El fenómeno de la difracción es una característica general de los fenómenos ondulatorios que ocurren donde quiera que una porción de un frente de onda sea de sonido o luz, es obstruido de alguna manera. Si en el transcurso del encuentro con un obstáculo transparente u opaco se altera una región del frente de onda en amplitud o fase, ocurrirá difracción [22]. Los varios segmentos del frente de onda que se propagan más allá del obstáculo interfieren para producir la distribución de densidad de energía particular conocida como patrón de difracción. No hay distinción física significativa entre interferencia y difracción. Sin embargo, se ha vuelto común, aunque no siempre apropiado, hablar de interferencia cuando se está considerando la superposición de solamente unas pocas ondas y difracción cuando se está tratando un gran número de ondas.

Como una aproximación inicial al problema, consideremos el principio de Huygens, el cual dice lo siguiente: "cada punto en un frente de onda primario sirve como fuente de ondas esféricas secundarias tales que el frente de onda primario un momento más tarde es la envolvente de estas

onditas. Además, las onditas avanzan con una rapidez y frecuencia igual a la de la onda primaria en cada punto del espacio". La técnica, sin embargo, ignora la mayoría de onditas secundarias, reteniendo sólo la porción común con la envolvente. Como resultado de esta deficiencia, el principio de Huygens no puede explicar el proceso de difracción. Sin embargo este principio es independiente de cualquier consideración de longitud de onda y predecirá las mismas configuraciones de onda en ambas situaciones.

La dificultad fue resuelta por Fresnel con su adición del concepto de interferencia. El principio de Huygens-Fresnel correspondiente establece que cada punto sin obstrucción de un frente de onda, en un instante de tiempo dado, sirve como una fuente de onditas secundarias esféricas (de la misma frecuencia que la onda primaria). La amplitud del campo (óptico o ultrasónico) en cualquier punto adelante es la superposición de todas estas onditas (considerando sus amplitudes y fases relativas).

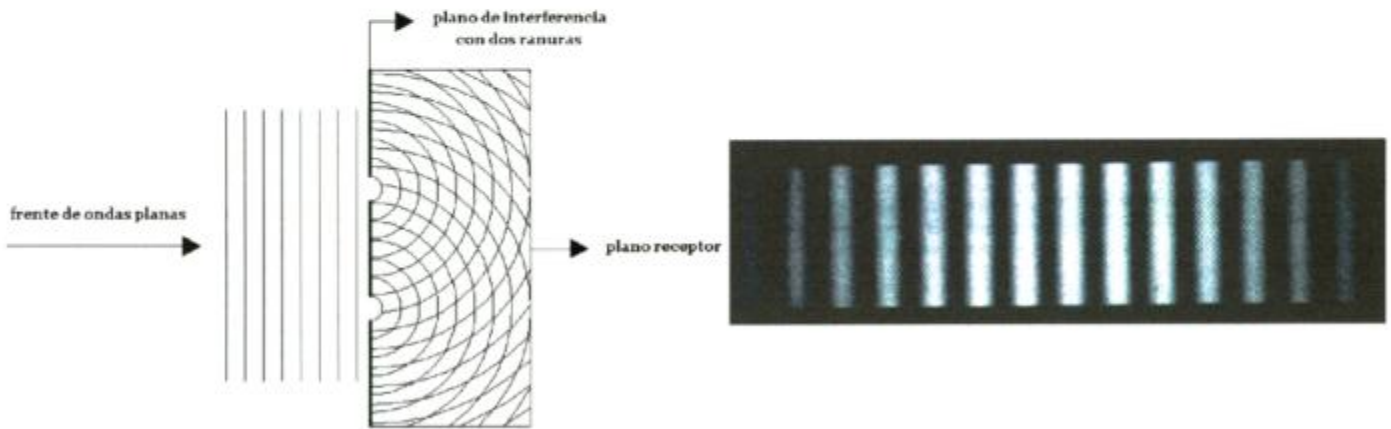


Fig. 3.2 Fenómeno de difracción en dos ranuras y patrón de difracción observado en el plano receptor.

Para entender mejor el fenómeno, imagínese una pantalla opaca con dos ranuras sobre la cual se hace incidir normalmente por un frente de ondas planas y supóngase que la sombra resultante se examina sobre un papel blanco o plano receptor, tal y como se observa en la figura 3.2. Relativamente cerca de la pantalla aparecerá una mancha brillante que concuerda en su forma con la abertura. Al retirarlo un poco más se hará patente una configuración de finas franjas que bordean las orillas de la mancha. Con el papel aún más lejos de la abertura, se desarrolla un extenso sistema de franjas que está limitado aproximadamente por la proyección geométrica del hueco. La figura sigue variando y extendiéndose a medida que la pantalla se retira de la abertura. Esto es lo que se llama difracción de Fresnel o de campo cercano. Por lo tanto, la distribución de la irradiación se habrá vuelto un sistema simétrico de franjas de vasta extensión, prácticamente sin parecido con la abertura. Más allá de cierta distancia no se apreciarán cambios perceptibles y fuera de un aumento continuo en el tamaño, el sistema de franjas aparece sin alteración. Esta es la difracción de Fraunhofer o de campo lejano, que siendo un caso límite, es más simple de tratar matemáticamente que la difracción de campo cercano.

El principio de Huygens-Fresnel tiene algunas desventajas además del hecho de que lo dicho anteriormente es bastante hipotético. Pero Gustav Kirchhoff demostró más tarde que el principio antes mencionado era una consecuencia directa de la ecuación diferencial de onda:

$$\text{ec. 3.1} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$

poniéndolo así sobre una firme base matemática. Aún así, esta teoría es en sí misma una aproximación que es válida para longitudes de onda suficientemente pequeñas, es decir, cuando las aberturas difractoras tienen dimensiones que son grandes en comparación con λ .

Debe recalcar que el problema de la determinación de una solución exacta para una configuración difractora particular está entre los más complicados que debe manejar la óptica (y por consiguiente el campo del ultrasonido). Incluso, ahora no existen soluciones rigurosas para muchas de las configuraciones de interés práctico. Por lo tanto, independientemente de la necesidad, confiaremos en los tratamientos aproximados de los principios antes mencionados.

3.4 Técnicas de dimensionamiento

Se debe dejar claro que cuando se hace referencia a la técnica TOFD automáticamente se asume que esta emplea dos transductores en una configuración del tipo delta. Esto no significa que sea la única forma de estudiar las ondas difractadas porque empleando un transductor en la modalidad de pulso-eco ya sea con uno o dos cristales, también se puede analizar dicho fenómeno de difracción. Cada técnica varía de acuerdo a las necesidades de inspección así como del tipo de discontinuidad que se quiera detectar. En el caso de este trabajo únicamente se han utilizado las tres técnicas [23] que a continuación se explican, esto con el objetivo de limitar las mediciones y para que sea más claro su entendimiento.

3.4.1 Empleando la técnica de transmisión

Esto se logra empleando dos transductores por separado (técnica de tandem, delta o V) donde uno actúa como transmisor y el otro como receptor (fig. 3.4). Gracias a la amplia cobertura permitida por las características del haz de los transductores empleados, esta técnica no es tan dependiente como en los métodos de pulso-eco de las variaciones en la posición del palpador u orientación relativa del reflector respecto del ángulo nominal de dicho dispositivo. Esto hace que la TOFD sea menos subjetiva en su aplicación y más efectiva como método de detección y dimensionamiento. Debido a la disposición de los transductores, siempre es común obtener unas señales características que corresponden a una superficial, una de fondo y dentro de ellas la(s) difractada(s). En algunas ocasiones estas señales pueden interferir con las difractadas lo que conduce a errores en las mediciones.

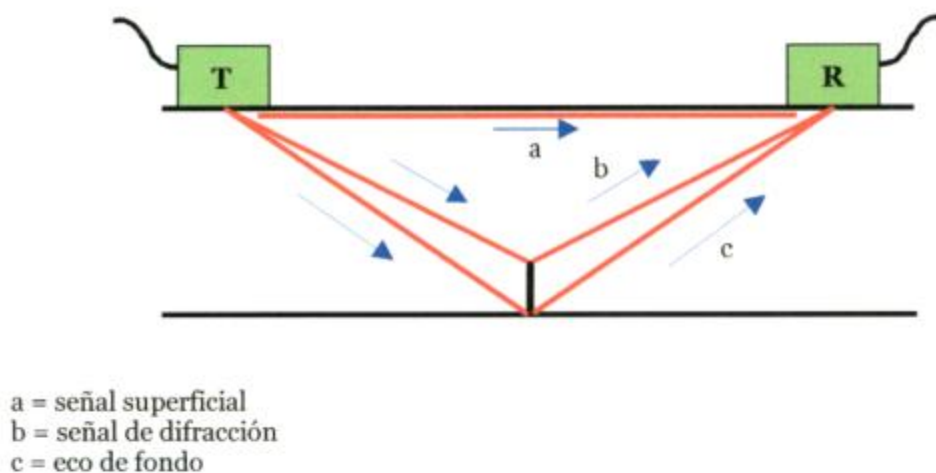


Fig. 3.4 Modalidad de transmisión por reflexión tipo delta o tandem.

Para la realización de los ensayos con esta técnica se recomienda utilizar transductores de onda longitudinal dentro de un rango de ángulos que va desde 45° hasta 70° . En la literatura se menciona que el mejor ángulo de incidencia corresponde a 65° para ondas longitudinales y la razón fundamental de su empleo es porque ninguna señal que se propague a velocidades más bajas, confunde la imagen obtenida. Respecto de las señales propiamente difractadas se sabe que poseen una baja amplitud (aproximadamente 20 dB menos que un taladro de 3 mm de diámetro) lo que obliga a realizar el ensayo con altas ganancias con el consecuente aumento del ruido (menor relación señal-ruido).

3.4.2 Empleando la técnica de pulso-eco

Para la determinación de la profundidad de fisuras, esta técnica emplea las mismas ondas difractadas pero en este caso, un mismo transductor funciona como transmisor y receptor al mismo tiempo, facilitando la ubicación del reflector. Existen dos técnicas principales:

- Técnica de tiempo relativo de vuelo, la cual mide el tiempo de vuelo entre la señal de reflexión directa y la señal de difracción (fig. 3.5 a).
- Técnica de tiempo absoluto de vuelo, la cual mide el tiempo de vuelo únicamente de la señal de difracción, desde dos posiciones diferentes (fig. 3.5 b).

Por lo general se emplean para estas dos técnicas, transductores de doble cristal o los de cristal simple que se encuentren en un rango de ángulos de incidencia entre 45° y 60° . La profundidad de la fisura puede ser fácilmente calculada al detectar su señal de difracción. Existen otros métodos que miden la señal cuando esta ha decaído a la mitad o cuando desaparece en el ruido pero no serán aplicadas en este trabajo. En esta técnica surge el problema de que el punto índice del palpador debe ser conocido con mucha exactitud mientras que si se utilizan dos palpadores, el punto índice queda determinado por la separación entre ambos, situación que es menos susceptible a errores. También se recomienda el empleo de ondas longitudinales con un ángulo de incidencia de 60° .

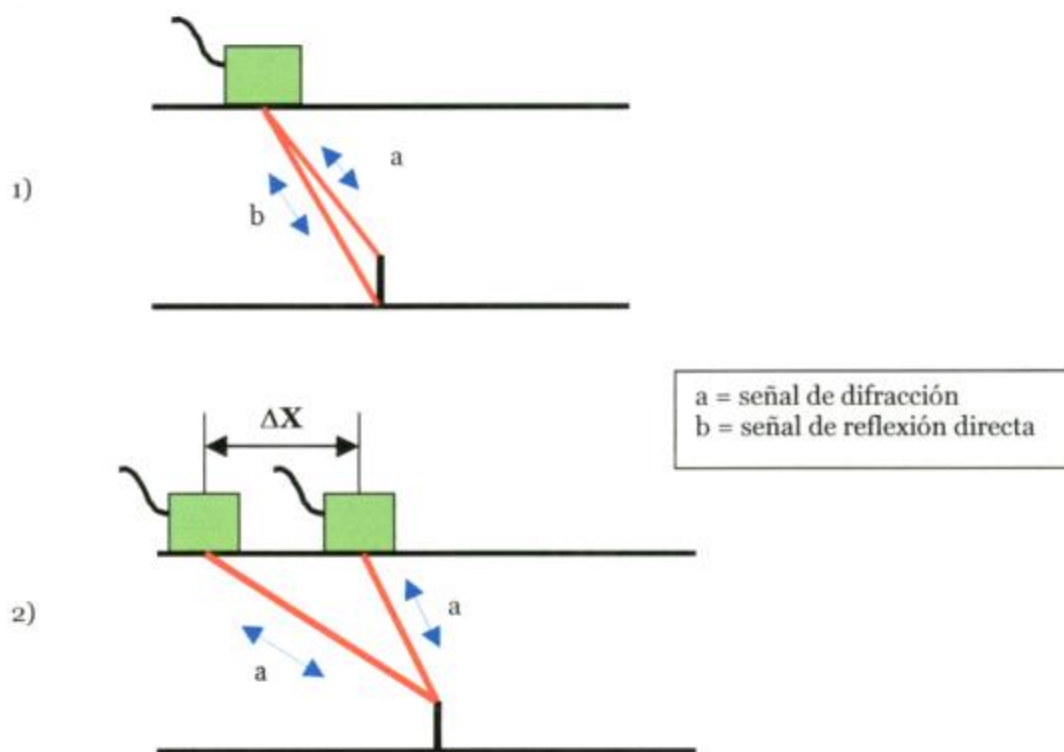


Fig. 3.5 Modalidad de pulso-eco en 1) tiempo relativo y 2) tiempo absoluto.

En la parte cuatro correspondiente a la sección experimental, las técnicas antes citadas se explicarán con mayor detalle.

3.5 Selección de transductores

Para la selección de los transductores se deben tomar en cuenta ciertas características que estos deben tener para lograr mejores resultados [24], entre ellas están:

- Es esencial que los ecos tengan una muy buena resolución por lo que se deben emplear transductores de pulso corto (banda ancha).
- La selección usual del modo de onda es del tipo longitudinal ya que poseen la mayor velocidad lo que evita la interferencia con otros ecos.

- Para mejorar la resolución se deben emplear transductores de alta frecuencia.
- Muchas veces se debe definir si se va a trabajar dentro del campo cercano del palpador ($D^2/4\lambda$) ya que esto puede afectar la resolución del ensayo.
- El ancho del haz ultrasónico puede afectar la naturaleza de los datos colectados. Lo importante es que el haz incida sobre la sección de interés, o sea, que "ilumine" en su totalidad la discontinuidad que se quiera estudiar. El empleo de transductores focalizados es relativo, por lo general no es aconsejable ya que la zona inspeccionada se reduce mucho.
- Para la mayoría de las inspecciones se recomienda emplear transductores con una frecuencia central que va desde los 2 MHz hasta los 10 MHz y cuyos diámetros oscilen entre los 6 y 20 mm.

A continuación se muestra una información de suma importancia para difracción ya que sirve de guía para poner a punto cualquier inspección que se deba llevar a cabo con gran precisión, teniendo en cuenta ciertos factores como la frecuencia, diámetro y ángulo de los transductores.

Tabla 3.1 : Transductores recomendados para rangos de trabajo de hasta 70 mm

espesor de pared	frecuencia nominal	diámetro de cristal	ángulo nominal
< 10 mm	de 10 a 15 MHz	de 2 a 6 mm	de 50 a 70°
de 10 a 30 mm	de 5 a 10 MHz	de 2 a 6 mm	de 50 a 60°
de 30 a 70 mm	de 2 a 5 MHz	de 6 a 12 mm	de 45 a 60°

Tabla 3.2 : Transductores recomendados para rangos de trabajo de 70 a 300 mm

rango de profundidad	frecuencia nominal	diámetro de cristal	ángulo nominal
< 30 mm	de 5 a 10 MHz	de 2 a 6 mm	de 50 a 70°
de 30 a 100 mm	de 2 a 5 MHz	de 6 a 12 mm	de 45 a 60°
de 100 a 300 mm	de 1 a 3 MHz	de 10 a 25 mm	de 45 a 60°

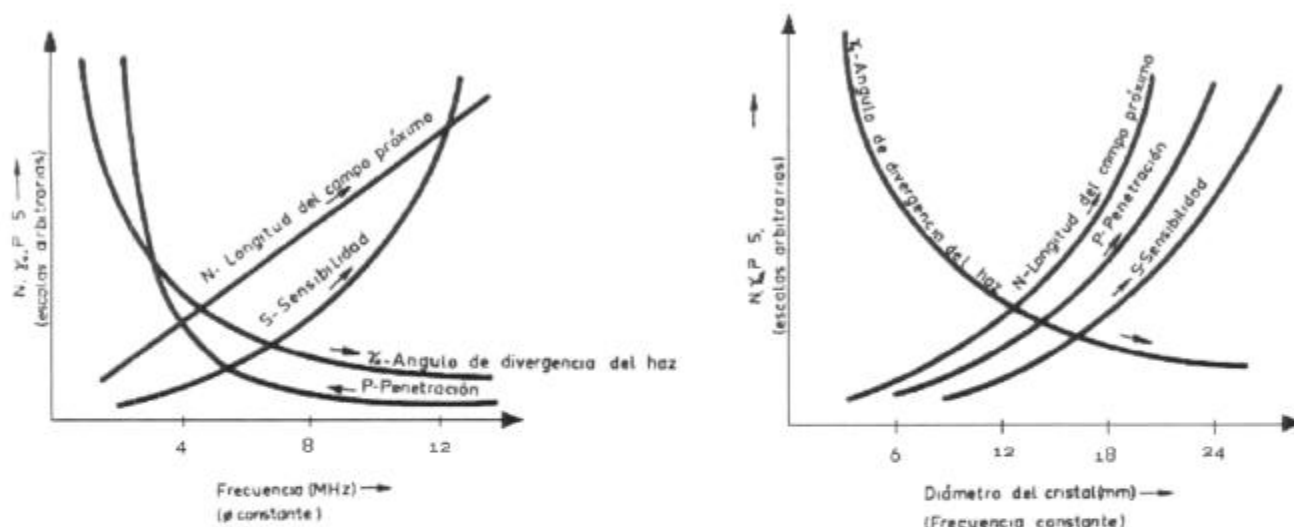


Fig. 3.6 Comportamiento de las diferentes variables al modificar las propiedades de un palpador.

3.6 Tipos de discontinuidades detectables

A continuación se presentan algunas de las discontinuidades más comunes que pueden ser detectadas con las técnicas basadas en las señales de difracción [25]. Lógicamente que en la teoría puede resultar fácil la aplicación de la técnica pero en la práctica esto puede cambiar, aún cuando se inspeccionan geometrías sencillas .

3.6.1 Fisuras y falta de fusión

De manera general, la técnica TOFD es considerada particularmente como sensible a los defectos planares verticalmente orientados tales como fisuras y falta de fusión, donde la disposición de la discontinuidad es de ± 30 grados fuera del eje normal del haz. Lo que menos se aprecia a menudo es que la técnica también es sensible virtualmente a todos los tipos de defectos; independientemente de la orientación. Esta versatilidad es en parte atribuible a la amplia gama de ángulos que es posible cubrir (en todos los planos) por la característica divergencia del haz empleado y en parte como consecuencia de la física involucrada. En términos muy simples, todas las discontinuidades absorben e irradian la energía mecánica inducida por la excitación ultrasónica (vibración). Debido a que la TOFD emplea un transmisor y un receptor, la mayoría de la energía reflejada se ignora y sólo las señales difractadas provenientes de la periferia del defecto son detectadas. Esto se aplica independientemente del tamaño, tipo, orientación o posición y, proporcionando la ubicación de estos dentro del haz ultrasónico, las señales difractadas (cuya amplitud es muy baja) desde sus bordes serán capturadas y desplegadas en una posición relativamente correcta.

Con las fisuras muy cerradas, o donde las discontinuidades se encuentran contaminadas con depósitos de material capaz de admitir el pasaje del ultrasonido, los fenómenos de transmisión a veces pueden ocurrir. La imagen resultante aparece como una sombra translúcida hecha por las señales difractadas a través del cuerpo del defecto y éstas puede resaltar a menudo detalles microscópicos como las llamadas "marcas de playa" donde la propagación de la fisura de fatiga se ha llevado a cabo durante su progresión destructiva.

3.6.2 Defectos horizontales planares (laminaciones)

Otro concepto equivocado es que la TOFD no es efectiva en la detección y dimensionamiento de defectos ubicados en forma paralela a la superficie de inspección. Esto probablemente es así por el hecho de que la técnica es extremadamente sensible a las discontinuidades verticalmente orientadas pero, dependiendo de la forma de barrido, la TOFD no sólo es confiable para detectar la presencia de defectos como falta de fusión y laminaciones sino que también es capaz de posicionarlos con gran precisión y clasificarlos según su tamaño.

3.6.3 Defectos transversales

Debido a que las discontinuidades irradian señales de difracción en todas las direcciones y debido al ancho característico del haz tanto en los planos horizontales como verticales, la TOFD es igualmente sensible a la mayoría de los defectos transversales, incluso cuando los barridos axiales se realizan donde el eje principal del haz se ubica en el mismo plano del defecto.

3.6.4 Inclusiones

En soldaduras particulares de pobre calidad donde la incidencia de tales defectos es alta, se puede demostrar que es difícil reportar porosidad de acuerdo con los criterios establecidos de aceptación y rechazo en radiografía ya que las inclusiones lineales necesitan un análisis cuidadoso (y una posible cobertura adicional del barrido) para diferenciarlas entre las fallas que afectan principalmente la integridad del componente. A pesar de las limitaciones y la poca resolución que se obtiene comúnmente durante las inspecciones, la técnica TOFD ha demostrado ser la herramienta más confiable en la detección de este tipo de defectos.

3.6.5 Defectos estructurales

Debido a que las imágenes obtenidas con la TOFD realizan una buena cobertura de detección y es posible observar e informar el crecimiento de fisuras causadas por fatiga. También se ha demostrado que es posible cuantificar las fisuras causadas por la dilatación del cobre cuando se contamina una soldadura con el electrodo empleado, proporcionando de esta manera el conocimiento necesario del mecanismo que se sospeche sea el que provoque el defecto.

Este tipo de discontinuidades pueden afectar seriamente las condiciones íntegras de servicio, lo cual va más allá del alcance de la detección permitida en la mayoría de métodos disponibles de ensayos no destructivos y lo que le cuesta a la industria billones cada año en mantenimiento, reparación y tiempo fuera de servicio.

3.7 Ventajas y limitaciones de las técnicas de difracción

Esta como las demás técnicas aplicadas en los ensayos no destructivos posee sus pro y sus contra, las cuales conviene conocer para tratar de mejorarla en el momento en que se lleve a cabo una determinada inspección [25], [26].

3.7.1 Ventajas

A) Supervisión continua de las condiciones

Desde luego que hay ventajas claras comerciales al estar supervisando las condiciones del flujo productivo en vez de tener intervenciones técnicas no programadas. Donde se sabe con certeza de que existen defectos y se consideran que son críticos para la seguridad, estos pueden ser regularmente vigilados usando estratégicamente transductores posicionados en un instrumento remoto capaz de supervisar los cambios en las características de la forma de la señal y de acuerdo con esto, aplicando un cierto criterio de aceptación y rechazo se obtendrán productos de excelente calidad.

B) Seguridad

Dicha técnica es inherentemente más segura que cualquier forma de radiografía industrial y es menos perjudicial para el medio ambiente. En términos de seguridad global podría defenderse y demostrarse que el mejoramiento en la precisión en el reporte de defectos y la confiabilidad de la TOFD, hacen de esta una herramienta muy poderosa en la valoración de riesgos y que, como tal, es por sí misma un dispositivo de seguridad importante.

C) Costo

Hasta muy recientemente la percepción general de la TOFD ha sido que es un método muy costoso debido al equipo sofisticado que se debe emplear. En respuesta a esa situación, un cierto número de organizaciones han impulsado bajar los costos de la técnica realizando los ensayos con equipos convencionales de ultrasonido y con el personal tradicionalmente certificado.

Sin embargo, como resultado de la atención del mercado creciente, varios fabricantes han desarrollado instrumentación que es substancialmente menos cara, más portátil y más confiable permitiendo que el usuario se sienta cómodo.

Una de las grandes ventajas económicas a escala industrial es el hecho de que esta técnica ha reducido la cantidad de paradas innecesarias durante la producción gracias a la constante vigilancia de la mayoría de componentes involucrados, lo que a su vez trae como consecuencia una gran seguridad dentro de la planta y un mejor manejo de los recursos de producción.

Otras ventajas que se pueden citar son:

- Los datos de la inspección se obtienen inmediatamente y se les puede almacenar para su posterior análisis.
- Por lo general, basta con un solo barrido para poder coleccionar la cantidad de datos necesarios para realizar la evaluación.
- La probabilidad de detección aumenta hasta un 90% para discontinuidades del tipo planares o esféricas, cuando se compara con otras técnicas.

3.7.2 Limitaciones de aplicación

A) Limitaciones de temperatura

La TOFD no es significativamente diferente a otros métodos de inspección cuando se trata de su utilidad en componentes a temperaturas elevadas, donde la efectividad del medio acoplante es a menudo el factor limitante. Mediante el empleo de transductores resistentes a las altas temperaturas, aplicando técnicas de enfriamiento con agua y colocando grasas termoresistentes, es posible aplicar la TOFD a temperaturas mayores a los 200°C y, donde el enfriamiento local es permitido, se puede operar a temperaturas de hasta 350°C.

B) Materiales

Como ocurre con otras técnicas donde la medida de las señales transmitidas se utilizan en determinadas condiciones, la TOFD es susceptible a los efectos de la dispersión de energía a través de la difusión, absorción y atenuación y, debido a muy pequeños cambios en la respuesta de la señal lo cual es la base de la detección, la técnica no es apropiada para ser empleada en materiales de grano grueso.

C) Geometría compleja

Debido a sus orígenes en el área nuclear, la TOFD se ha desarrollado y se ha demostrado su uso en algunas condiciones geométricas muy complejas. En años más recientes esta especialización se ha adaptado para aplicaciones no nucleares como pueden ser los contenedores empleados en las industrias químicas, sistemas complejos de forjas o fundiciones y otras configuraciones estructurales.

Sin embargo, los procedimientos de barrido, calibración, presentación de los datos y proceso de análisis involucrados son a menudo tan complejos como la geometría y por lo tanto, el costo de la aplicación es normalmente alto.

D) Facilidad de interpretación

Esto no es problemático cuando se aplica en materiales relativamente limpios o de estructura fina donde la mayoría de anomalías serán detectadas pero, en materiales burdos de pobre fabricación, la sensibilidad de las técnicas puede traducirse como un obstáculo y, en ciertas circunstancias, se puede subestimar una tarea de tal importancia. Sin embargo, una vez más, esto debe verse en el contexto de cómo otras técnicas disponibles tratarían tales problemas. Las mismas e incluso mayores dificultades se podrían encontrar bajo estas circunstancias en las técnicas ultrasónicas basadas en la reflectividad cuyos resultados son menos fiables y en los ensayos radiográficos.

E) Aceptabilidad

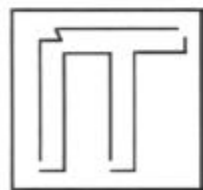
Quizás la limitación más significativa que enfrenta la aplicación rutinaria de la TOFD es el hecho que, a pesar de la inmensa cantidad de evidencia que prueba la efectividad de la técnica durante los últimos 25 años, esta permanece pobremente prescrita en los códigos, normas y procedimientos.

La poca aceptación de la TOFD se ha debido al hecho de que la mayoría de criterios de aceptación en uso hoy se relacionan con la radiografía y las técnicas ultrasónicas basadas en la reflectividad como métodos para el control de la calidad. A pesar de los grandes avances en la ciencia de los materiales, el conocimiento mejorado de los procesos de degradación, mejores técnicas de fabricación, procesos de operación más refinados y el progreso revolucionario en la tecnología de inspección, muchos de éstos a menudo emplean normas arcaicas que todavía están en uso hoy y que se proponen regularmente para la valoración de las condiciones en servicio y aplicaciones que no sostienen ninguna relevancia. La TOFD es ahora aceptada por muchas empresas y avalada por normas que aún están bajo revisión por entidades u organismos internacionales como el ASME y el API.

Otras limitaciones que se pueden citar son:

- Existe una zona muerta cercana a la superficie que no permite una buena detección de discontinuidades cercanas a ella.
- Es necesario que el personal se encuentre altamente capacitado.
- Para mejores resultados es necesario contar con equipo altamente especializado y que generalmente realice los barridos de forma automática.

Parte IV



Parte IV: "Sección experimental"

4.1 Introducción

El objetivo de esta parte del trabajo es proporcionar toda la información técnica útil que ha sido empleada durante las experiencias realizadas. No sólo se contemplan las características más importantes de los equipos empleados sino que también se muestra el procedimiento seguido para la realización de experimentos así como la toma de datos.

4.2 Construcción de las probetas

Durante la fabricación de las probetas deben tenerse en cuenta varios aspectos que pueden facilitar de gran manera las mediciones. Tres de ellos son: la geometría, la absorción ultrasónica y el tamaño de grano.

El primer punto tiene una estrecha relación con la cantidad y con el tamaño de las ranuras que se deseen incluir en la probeta, lo que se debe tener en cuenta es que no se interfieran unas con otras durante las mediciones, desde cualquier posición que se necesiten observar. Lo anterior también queda determinado por el ángulo de incidencia que se quiera emplear y por el tipo de material. Entonces, si se necesita trabajar con ranuras pequeñas (menores a 10 mm por ejemplo) y con palpadores cuyo ángulo oscile los 45° o menos, la probeta podrá ser de poco espesor; pero si las ranuras aumentan progresivamente de tamaño y de la misma manera los ángulos de los palpadores empleados, necesariamente el espesor y longitud de la probeta deberán aumentar.

Con respecto a la atenuación ultrasónica y el tamaño de grano que posee el material a ensayar son dos características que van unidas, ya que si el material fuera de grano muy grueso habría una mayor pérdida de energía acústica por razones de dispersión y atenuación. Un valor adecuado de atenuación de un material sería de 0.01 dB/mm y dentro de este se encuentran las probetas de acero y con un valor de 0.02 dB/mm las de aluminio. En ningún momento se determinó el tamaño de grano para las probetas sino que solamente se midió la atenuación ultrasónica que es lo que determina si se logrará ver o no la señal difractada. Para determinar el grado de atenuación el criterio que se siguió fue el de obtener materiales ultrasónicamente similares, lo que se hizo fue calibrar el equipo con un material conocido llevando la señal obtenida hasta un cierto porcentaje de la altura total de la pantalla (ATP) como por ejemplo el 80% y luego realizar una lectura sobre el material desconocido; no se aceptaría ningún material cuya señal cayera más allá del 40% ATP, o sea, -6 dB, ya que la atenuación sería bastante alta y podría dificultar la identificación de los ecos de difracción.

Con respecto a las ranuras que deben llevar las diferentes probetas, la idea es poder representar de forma aproximada, las discontinuidades que pueden encontrarse en la realidad. Para esto se ha recurrido a dos métodos distintos: electroerosión y fatiga. El primer método permite realizar las ranuras en cualquier dirección y en cualquier material. Su principal inconveniente es que el ancho del alambre es mayor de lo que podría ser una fisura real, además de que los bordes quedan un tanto redondeados y no en V como es recomendable, lo que trae como consecuencia una pérdida de la amplitud de la señal difractada. Tal y como aconseja la norma BS7706 en su apartado 6.7, la apertura máxima que debe tener la ranura para poder obtener señales difractadas fácilmente observables es de $\frac{1}{4}$ de λ , según el palpador empleado. Por lo tanto si se utiliza un transductor de ondas transversales con frecuencia de 4 MHz en acero, λ tendría un valor aproximado de 0.81 mm, por lo que la discontinuidad debería tener una apertura máxima de 0.20 mm lo cual es muy difícil obtener mediante la electroerosión en un material como el acero ya que el alambre con que se realiza se cortaría con mucha facilidad.

Con respecto al método de fatiga, este ofrece la gran ventaja de que se pueden hacer fisuras muy similares a las discontinuidades reales pero con el inconveniente de que la geometría de la probeta empleada para fatiga no permite orientar la fisura en un ángulo determinado, a menos de que sea mecanizada o cortada de la forma deseada lo que obliga a aumentar las dimensiones de la probeta original. Este tipo de ranuras revisten gran interés porque con ellas se puede observar la diferencia en resolución que pueden tener los transductores monoelemento respecto de los piezocompuestos, además de que se puede estudiar la apertura de la fisura necesaria a partir de la cual el ultrasonido comienza a detectar la señal difractada para cada tipo de palpador. Este último punto se tratará en el apartado donde se analiza todo lo concerniente al ensayo de flexión.

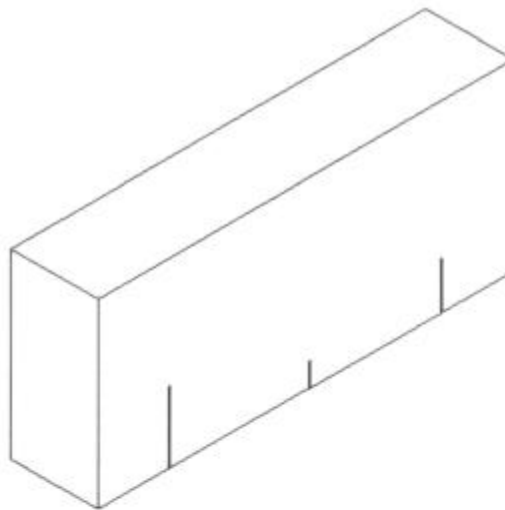
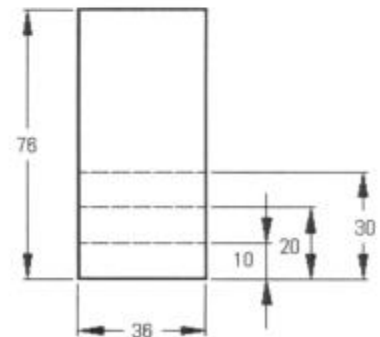
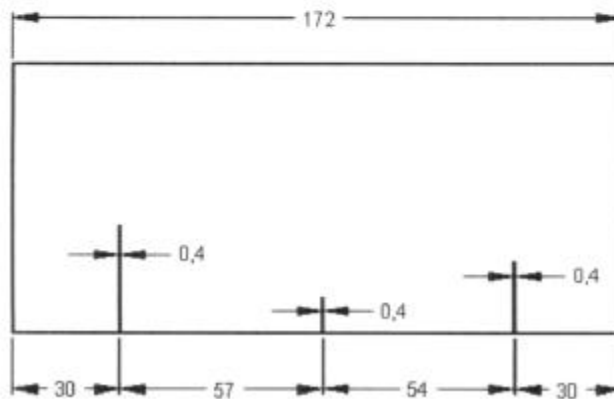
Por último, cabe destacar que todas las probetas empleadas deben tener un cierto grado de rugosidad (el menor posible) para evitar pérdidas de energía acústica durante el ensayo, lo deseable es lograr un pulido aproximado al obtenido con papel de lija #400 sobre las caras donde se colocarán los transductores. Este pulido permite entre otras cosas realizar un barrido más uniforme ya que los transductores se deslizan más fácilmente sobre la superficie y hacen que el empleo de acoplante sea menor y más eficiente. Un buen pulido también facilita las tareas de calibración y toma de datos ya que la variación en la amplitud de las señales es mínima.

Probeta #1

material: acero SAE 1010

dimensiones: 36 x 76 x 172 [mm]

cantidad de ranuras: 3 (electroerosión)

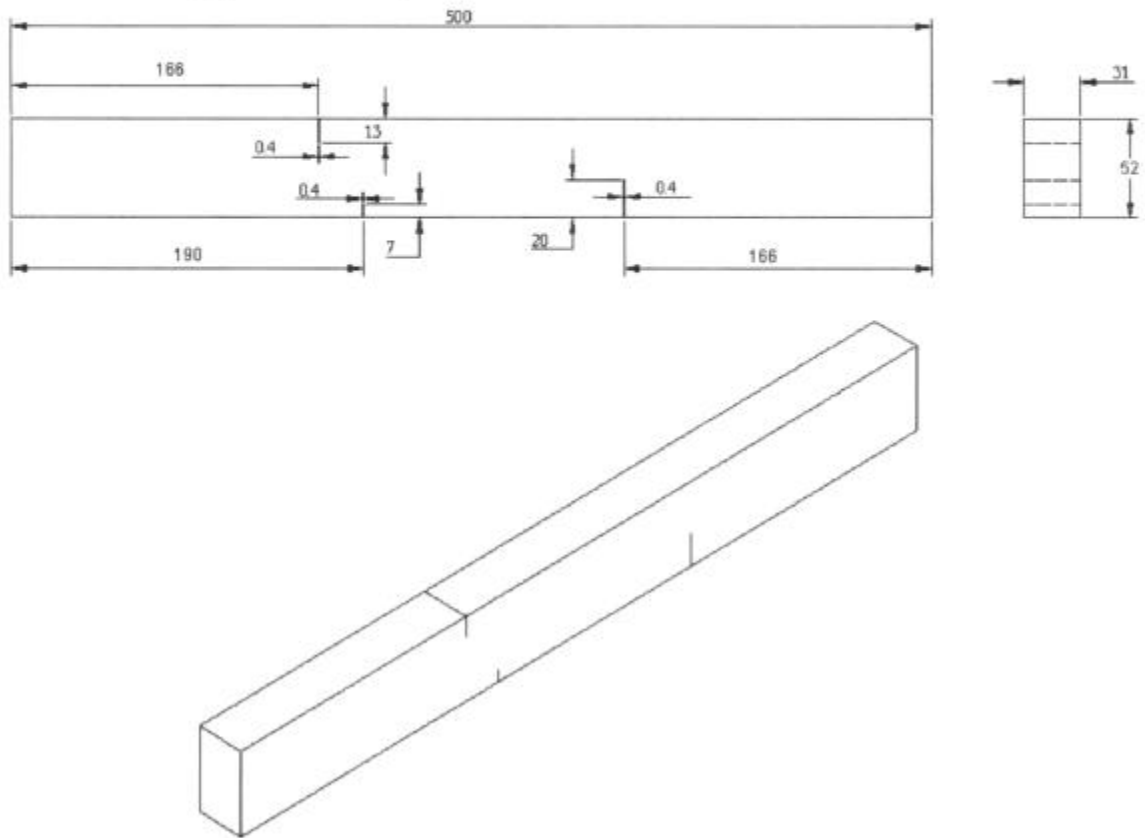


Probeta #2

material: acero SAE 1010

dimensiones: 31 x 52 x 500 [mm]

cantidad de ranuras: 3 (electroerosión)

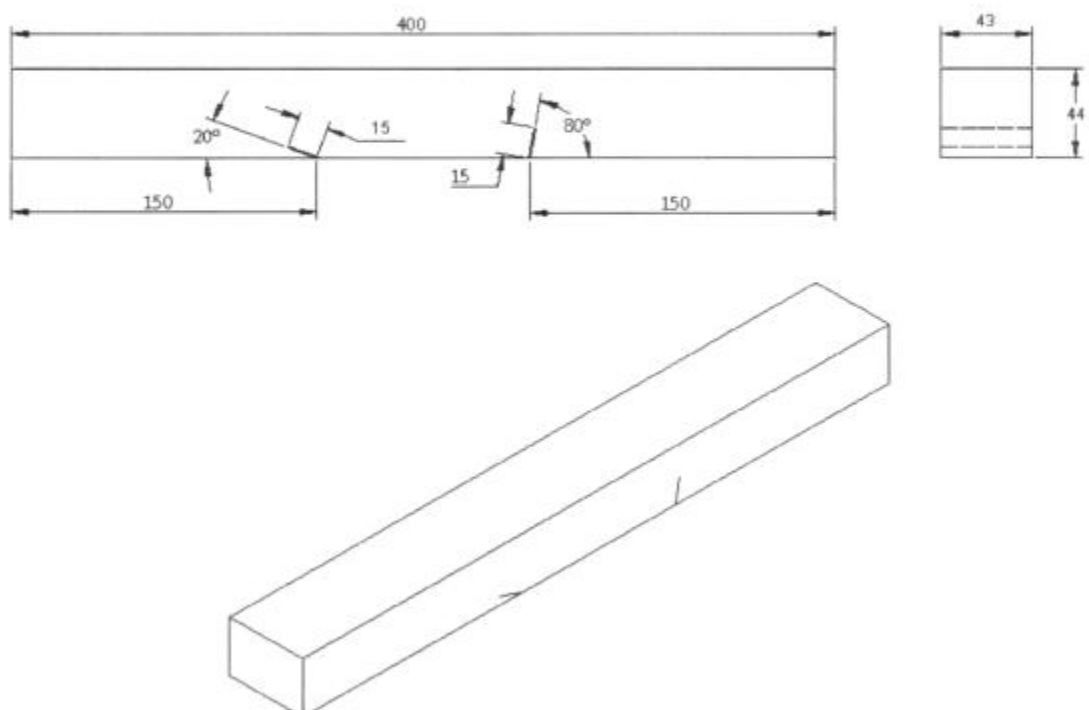


Probeta #3

material: aluminio puro

dimensiones: 43 x 44 x 400 [mm]

cantidad de ranuras: 2 (electroerosión)

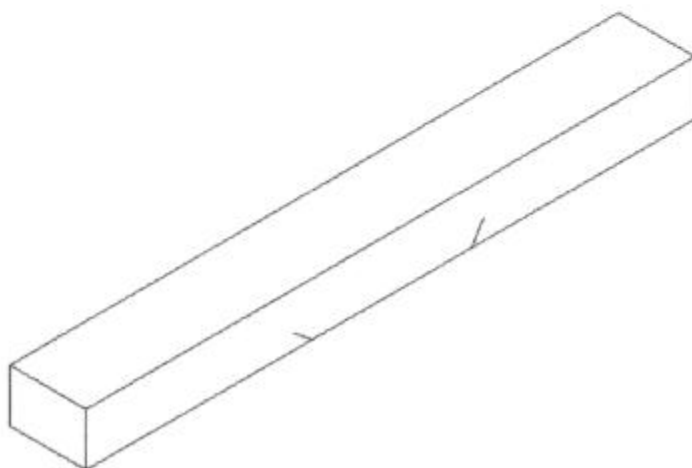
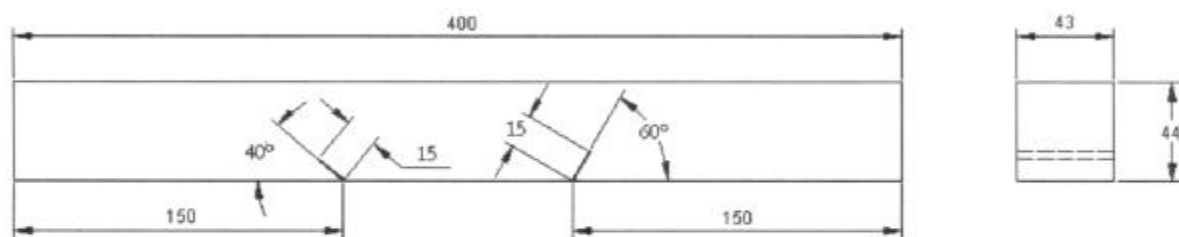


Probeta #4

material: aluminio puro

dimensiones: 43 x 44 x 400 [mm]

cantidad de ranuras: 2 (electroerosión)

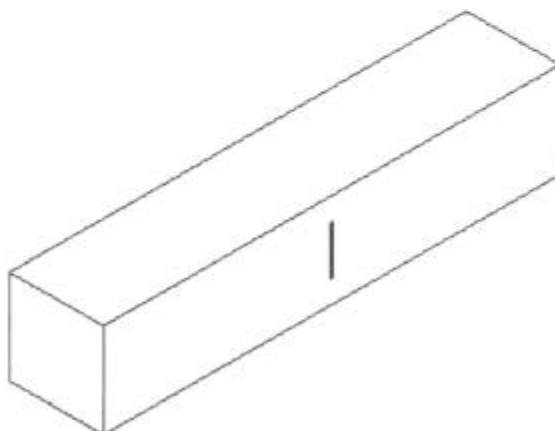
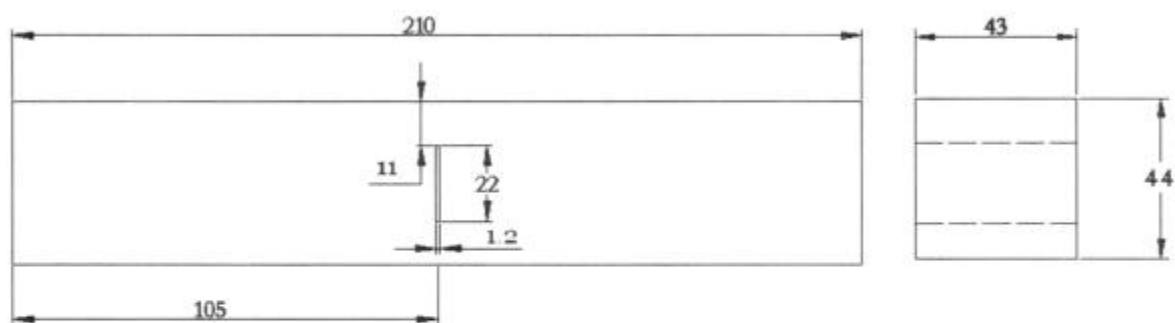


Probeta #5

material: aluminio puro

dimensiones: 43 x 44 x 210 [mm]

cantidad de ranuras: 1 (electroerosión)

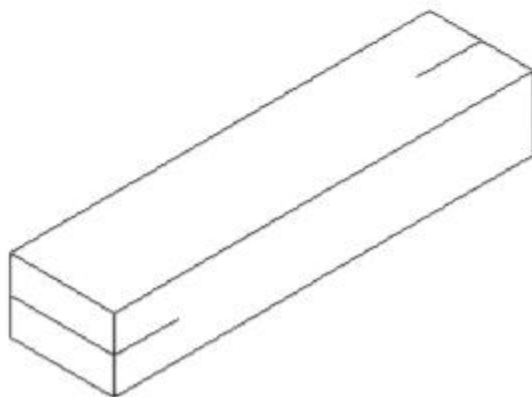
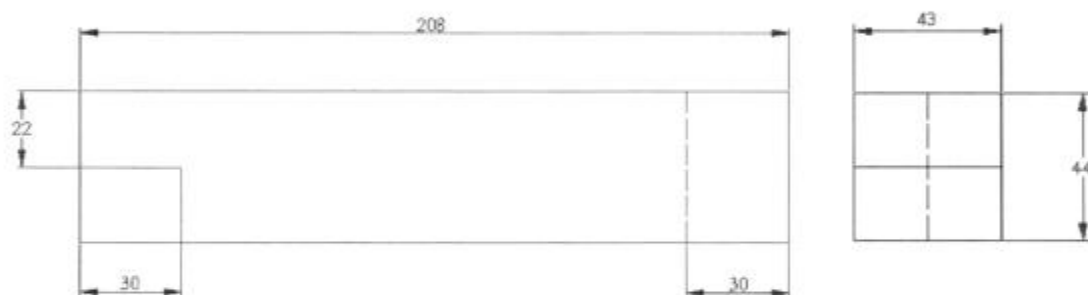


Probeta #6

material: aluminio puro

dimensiones: 43 x 44 x 208 [mm]

cantidad de ranuras: 2 (electroerosión)

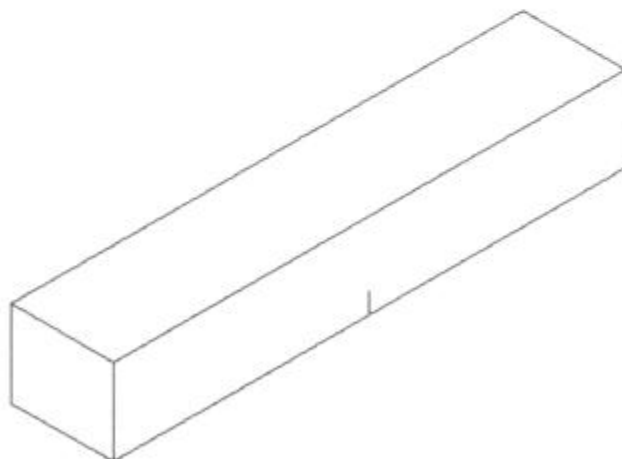
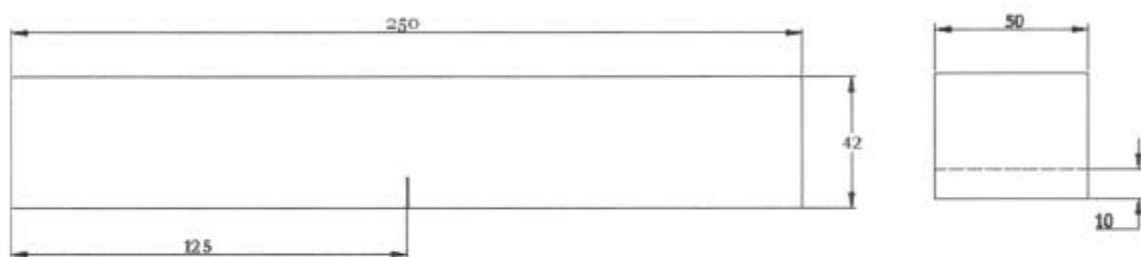


Probeta #7

material: acero SAE 1010

dimensiones: 50 x 42 x 250 [mm]

cantidad de fisuras: 1 (fatiga)

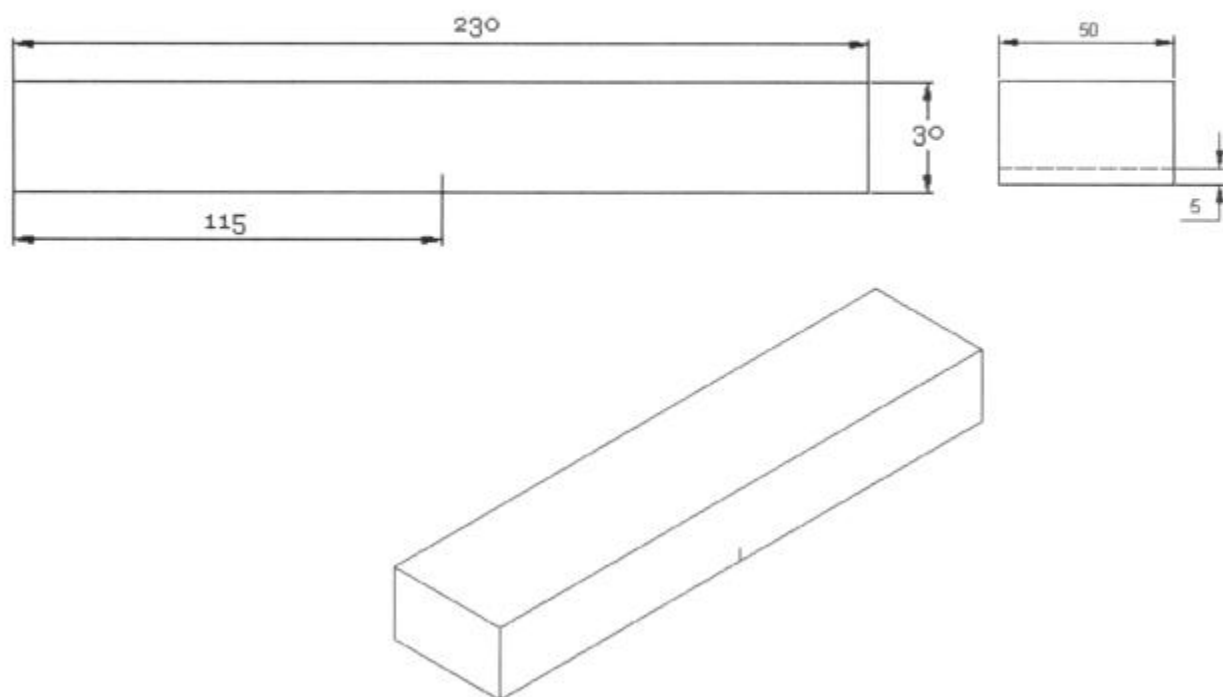


Probeta #8

material: acero SAE 1010

dimensiones: 50 x 30 x 230 [mm]

cantidad de fisuras: 1 (fatiga)



4.2.1 Atenuación de las ondas ultrasónicas en cada material

Considerando que el objetivo del ensayo de ultrasonido es la determinación del tamaño y posición de una discontinuidad, el grado de atenuación [27] que se produce cuando el ultrasonido interactúa con el material tiene importancia por las siguientes razones:

- Indica la factibilidad de ejecución del ensayo de ultrasonido. En caso de existir un alto grado de atenuación (> 0.04 dB/mm) el nivel de ruido generado impide la detección de las discontinuidades presentes cuya reflexión no es completa ya sea por las características de su superficie, por sus dimensiones, por su ubicación, por la dirección de reflexión (falta de paralelismo con respecto a la superficie de apoyo del palpador), por su forma (puede ser muy compleja) o por sus características absorbentes.
- Permite conocer las dimensiones verdaderas de los defectos detectados mediante cálculo, en caso de que se utilice algún tipo de gráfico en especial como por ejemplo las curvas DAC.

En los casos de alto grado de atenuación, puede resultar muy difícil la determinación del tamaño de la discontinuidad, dado que la señal generada por la atenuación (conocida como pasto o hierba) puede cubrir la señal correspondiente al defecto.

La atenuación a para un determinado material se determina según la siguiente ecuación:

$$\text{ec. 4.1} \quad a = \frac{20 \log_{10} (H_1 / H_2)}{x}$$

H_1 = altura del eco en dB medido en la pantalla del equipo ultrasónico empleando una compuerta (gate).

No se utiliza el eco inicial o de salida.

H_2 = altura del segundo eco o cuarto eco con respecto del eco 1.

x = distancia del camino sónico entre H_1 y H_2 que recorre la onda ultrasónica ida y vuelta hasta el palpador.

Pero se puede emplear una ecuación más simplificada que la anterior en donde se tiene en cuenta un valor negativo debido a la divergencia del haz en el campo lejano, quedando de la siguiente manera:

$$\text{ec. 4.2} \quad a = \frac{\Delta dB - 6 dB}{x}$$

Para determinar la atenuación del patrón de calibración V1 como un caso de ejemplo, se tiene el siguiente esquema:

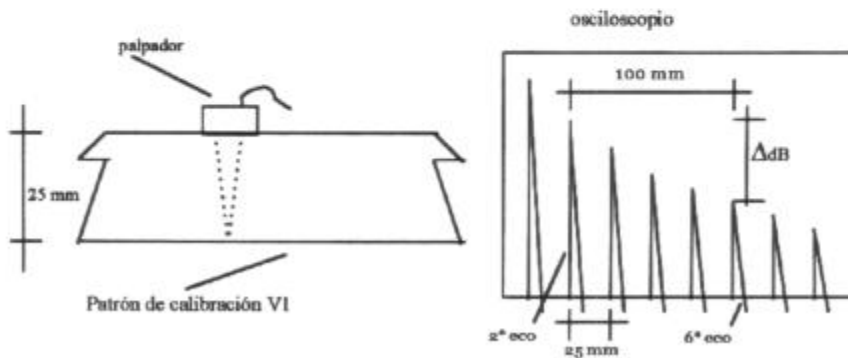


Fig. 4.1 Atenuación calculada sobre el bloque patrón V1.

Entonces empleando la ecuación 4.2 y tomando los datos siguientes, la atenuación para el bloque patrón es:

- altura de pantalla = 80%
- segundo eco = 22 dB
- sexto eco = 30 dB

$$a = \frac{\Delta dB - 6 dB}{x} = \frac{8 - 6}{200} = 0.01 dB / mm$$

4.2.2 Realización de ranuras mediante electroerosión

Datos técnicos

Corriente utilizada: 7 A
 Voltaje empleado: 40 V
 Diámetro de hilo: 0.25 mm
 Material del hilo: aleación Cu-Zn

Es necesario destacar que todas las ranuras fueron hechas con el mismo hilo y que el diámetro de este no se pudo reducir debido a la poca resistencia que ofrecía, en otras palabras, se trabajó de esta forma para que por un lado se pudiera evitar que el alambre se partiera durante la electroerosión y para que además ofreciera una apertura de ranura del menor tamaño posible.

4.3 Caracterización de los equipos de ultrasonido

4.3.1 Especificaciones del equipo ultrasónico USD 15 S [28]

Rango (range)

Desde 5.6 mm hasta 9906 mm, se pueden seleccionar por pasos o variarlos continuamente.

Velocidad

Desde 1.02 hasta 12.7 mm/ μ s y se pueden programar dos velocidades.

Retardo de señal (delay)

Desde 0 μ sec hasta 999.99 μ sec.

Compensación de cero (zero)

Desde 0 hasta 1600 μ sec.

Ganancia (gain)

Desde 0 hasta 110 dB donde se puede variar en pasos de 0.5, 1, 2 y 6 dB.

Modos de prueba

Pulso-eco y dual.

Pulsador (pulser)

Pulso negativo, pico máximo de 480 V, tiempo de caída <30 ns. Carga del capacitor ajustable entre 220, 1000 y 2000 pF.

Frecuencia de repetición del pulso

De 1 a 1200 Hz, ajustable en pasos de 50 Hz.

Rectificación

Positiva media onda, negativa media onda, onda completa, radio frecuencia y banda ancha.

Supresión (reject)

Controlable desde 0 hasta 80% absolutamente lineal.

Unidades

Pulgadas y milímetros.

Pantalla

Medidas de 195 x 97 mm, alta resolución con brillo ajustable, tipo de presentación tipo A, densidad de pixeles de 512 x 256.

Compuerta (gate)

Posee tres puertas independientes (una de ellas puede ser utilizada como interface o compuerta de inicio) ajustables a todo el ancho de la pantalla.

Modos de medición

Camino sónico recorrido, distancia proyectada, profundidad y amplitud de señal desplegada como porcentaje o en decibeles.

Conectores

Tipo Lemo.

Amortiguamiento (damping)

Ajustable: 33, 50, 75 y 500 Ohms.

Amplificador

Ajustable: banda ancha desde 0.3 MHz hasta 20 MHz

filtros de banda angosta desde 0.5, 1, 2, 2.5, 4, 5, 10 y 15 MHz.

Curvas (DAC/TCG)

Puede almacenar más de 20 ecos de referencia, rango dinámico de 40 dB, máxima pendiente de 6 dB/ μ sec. Curvas TCG y CGB se pueden realizar con la compuerta A.

Otras funciones

Opciones de pantalla incluye: congelamiento de señal, congelamiento del pico y puede desplegar un promedio de los últimos 2-16 recuadros en modo rectificado.

Salida

RS 232C para comunicaciones bidireccionales. Interface de 37 pines con alarma y salidas análogas, (tiempo de vuelo o amplitud) para cada compuerta en tiempo real en el modo de radiofrecuencia. Entrada sync., salida sync., seteo de alarmas, realización de chequeo de datos.

Fig. 4.2 Equipo digital de ultrasonido USD 15 S.



4.3.2 Especificaciones del equipo ultrasónico USN 52 R [29]

Rango (range)

Desde 5 mm hasta 5000 mm, se pueden seleccionar por pasos o variarlos continuamente.

Velocidad

Desde 1000 hasta 9999 m/s y se pueden programar dos velocidades.

Retardo de señal (delay)

Desde -20 μ sec hasta 999 μ sec.

Compensación de cero (zero)

Desde 0 hasta 1600 μ sec.

Ganancia (gain)

Desde 0 hasta 110 dB donde se puede variar en pasos de 0.1, 0.5, 1, 2, 6 y 24 dB.

Modos de prueba

Pulso-eco y dual.

Pulsador (pulser)

Pico/pulso de excitación.

Frecuencia de repetición del pulso

Ajustable entre alta o baja.

Rectificación

Positiva media onda, negativa media onda, onda completa y radio frecuencia.

Supresión (reject)

Controlable desde 0 hasta 80% absolutamente lineal.

Unidades

Pulgadas y milímetros.

Pantalla

Medidas de 146 x 67 mm, alta resolución con brillo ajustable, tipo de presentación tipo A, densidad de pixeles de 552 x 256.

Compuerta (gate)

Se puede ajustar sobre todo el barrido en incrementos de 0.1 mm, alarma indicativa, umbral ajustable desde 10% hasta el 90% de la altura total de pantalla. Se puede separar en una segunda compuerta cuando se emplea el modo de multi-eco.

Modos de medición

Desde el primero al segundo eco con una resolución mayor a los 245 mm, multi-eco en compuerta con un segundo umbral ajustable, tiempo de vuelo del pico o flanco en compuerta, evaluación de la amplitud respecto de la altura de la pantalla o con umbral de 127%, indicación de dB como adición o substracción, ubicación trigonométrica de la discontinuidad.

Conectores

Tipo Lemo.

Amortiguamiento (damping)

Ajustable: 50, 75, 150, 1000 Ohms.

Amplificador

Ajustable: banda ancha desde 0.4 MHz hasta 10.2 MHz

Baja: 0.25 a 4.90 MHz; Alta: 2.30 a 10.8 MHz; DIN: 1.70 a 8.20 MHz

Curvas (DAC/TCG)

Rango dinámico de 40 dB con un declive de 6 dB/ μ sec.

Otras funciones

Corrección de curvatura, compuerta móvil en modo estático (congelado), auto calibración de la velocidad del material y cero del transductor.

Salida

Analógica TOF y amplitud, TTL Go/NoGo, sincronización.

Fig. 4.3 Equipo digital de ultrasonido USN 52 R.



4.4 Caracterización de los transductores

La caracterización de los transductores se llevó a cabo empleando el siguiente procedimiento, basado en la norma ASTM E 1065-98 [30] :

- Se acopla el transductor que va a ser estudiado sobre un material adecuado (el resultado es independiente del material al cual se acople el transductor) como lo puede ser el bloque de calibración V1. Se debe tener el cuidado de que este no se mueva durante el ensayo y que a su vez las señales presenten una máxima relación señal-ruido.
- Una vez colocado el transductor en la posición correcta y conectado este al equipo en el modo emisor-receptor, se visualiza la señal en la presentación tipo radiofrecuencia.
- Se conecta la salida RF del equipo de ultrasonido a la entrada de uno de los canales del osciloscopio.
- Se ajustan los controles de base de tiempo y amplitud del osciloscopio para tratar de optimizar la señal en pantalla. La señal a estudiar será el primer eco proveniente del material acoplado.
- La señal optimizada en amplitud es aquella que no sobrepase los límites de la pantalla mientras que la base de tiempos se debe ajustar de forma tal que se llegue a un compromiso (depende de la señal visualizada), para que la FFT (Fast Fourier Transform) sea lo más representativa posible.
- Una vez obtenida la señal adecuada se presiona el botón de FFT y automáticamente se visualiza la transformada correspondiente, la cual se realiza mediante una convolución ó función matemática llamada "ventana de Hanning".
- Por último, con ayuda de un programa llamado WaveStar se adquieren las imágenes correspondientes a cada caso en particular y se hacen los ajustes necesarios para representarla en una escala adecuada.

Según la norma antes mencionada, podemos definir también las variables del ensayo para tener un mejor análisis de las características del transductor.

ancho de banda (W): es la porción de frecuencias limitada por los 6 dB a partir de la amplitud máxima y hacia cada extremo de la curva obtenida. La fórmula empleada es la siguiente:

$$\text{ec. 4.3} \quad W = \frac{f_u - f_l}{f_c} * 100 \quad \begin{array}{l} f_l = \text{frecuencia menor [MHz]} \\ f_u = \text{frecuencia mayor [MHz]} \end{array}$$

frecuencia central (f_c): es el valor de frecuencia que se encuentra al medio, dentro de los límites de ancho de banda definidos.

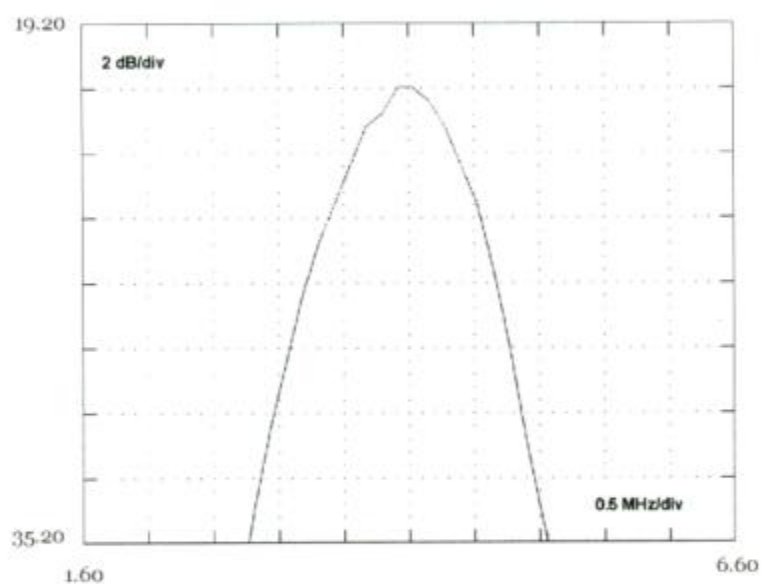
$$\text{ec. 4.4} \quad f_c = \frac{f_l + f_u}{2}$$

frecuencia pico (f_p): es el valor de frecuencia en el punto de máxima amplitud de la curva.

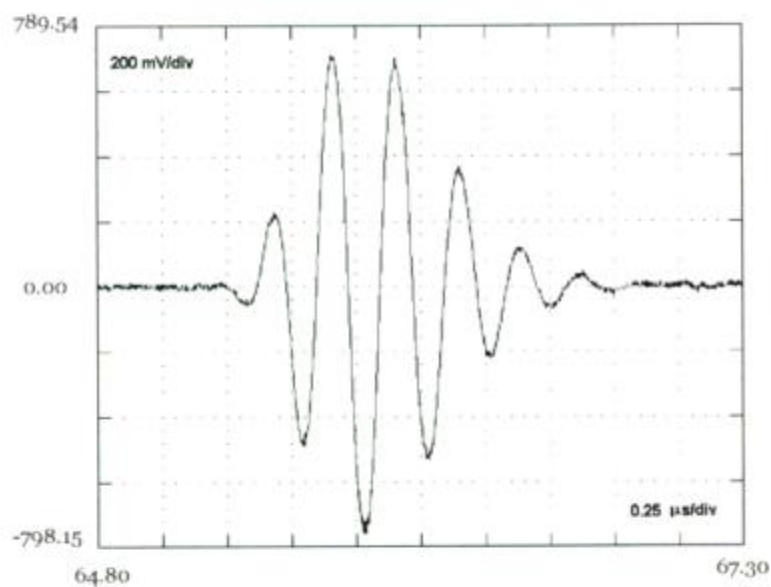
duración del pulso : es la longitud del tren de onda sinusoidal empleado para excitar al transductor, lo que puede ser expresado en unidades de tiempo o número de ciclos. El tiempo de duración del pulso se toma en un rango dentro del cual se produce una caída de la amplitud máxima de un 10%, que corresponde a una caída de 20 dB.

A continuación se muestra la caracterización correspondiente a los transductores empleados en los ensayos.

4.4.1 Transductores MWB de 4 MHz, onda transversal



Espectro de frecuencias

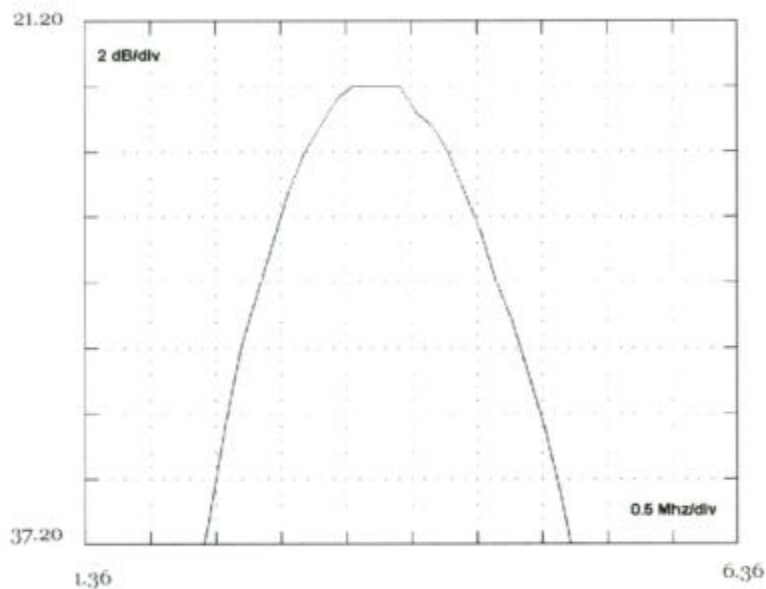


Duración del pulso

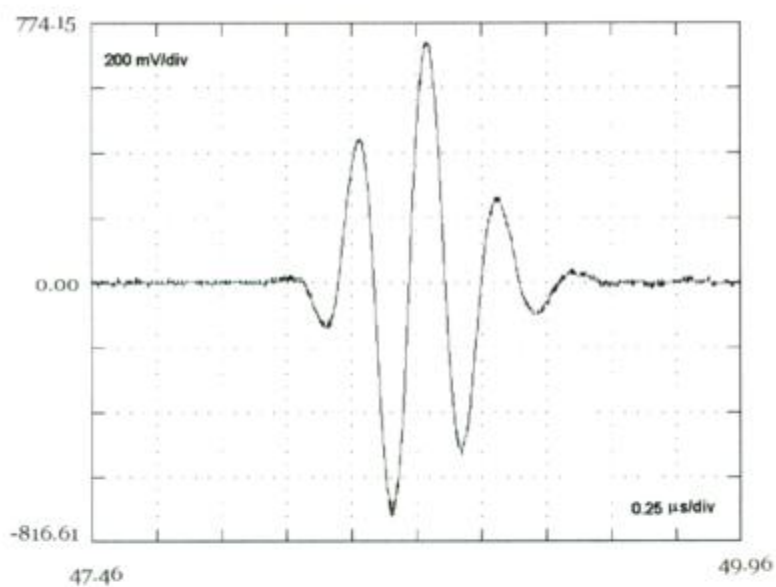
Frecuencia pico = 4.09 MHz
Frecuencia central = 4.05 MHz
Ancho de banda = 3.32 MHz , 4.78 Mhz → 36.05%
Duración del pulso = 1.2 μs
Dimensiones del cristal = 8 x 9 mm
Area de contacto = 24 x 13.5 mm



4.4.2 Transductores WSY de 4 MHz, onda longitudinal

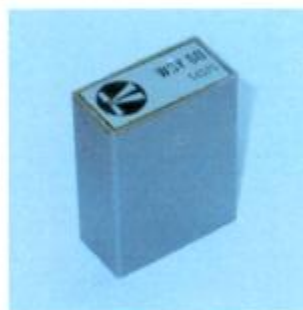


Espectro de frecuencias

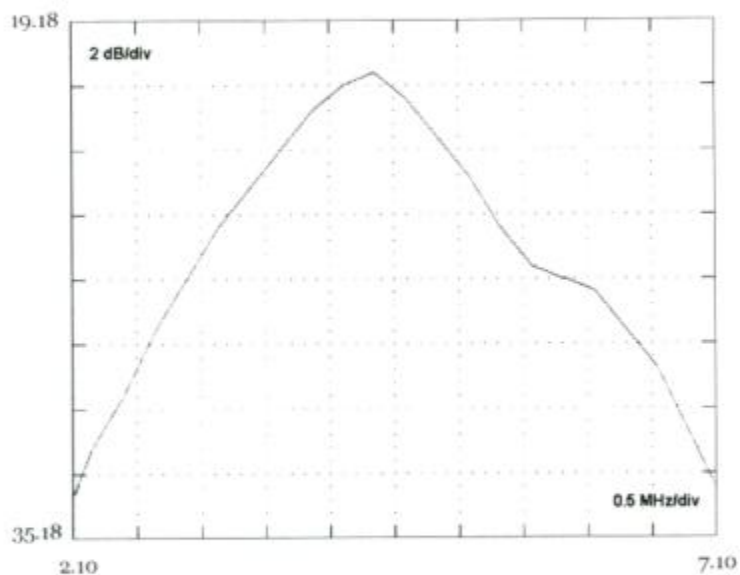


Duración del pulso

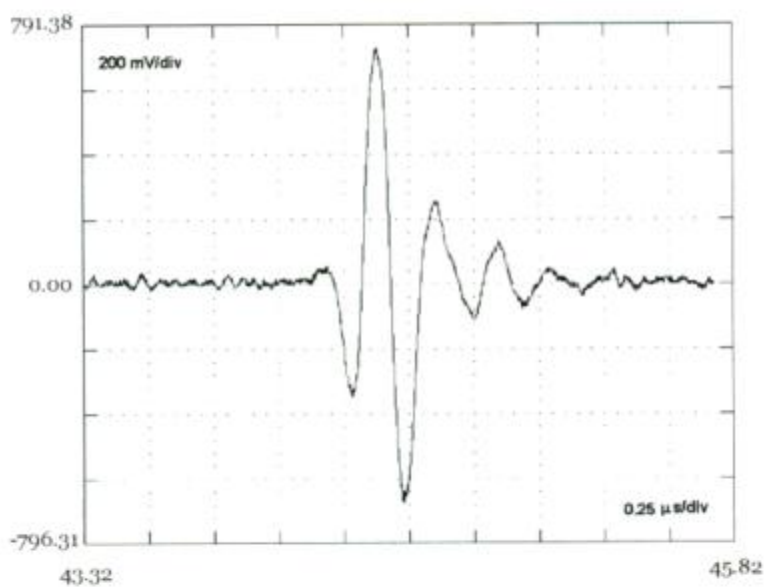
Frecuencia pico = 3.60 MHz
Frecuencia central = 3.62 MHz
Ancho de banda = 2.71 MHz , 4.52 Mhz $\rightarrow$ 50.00%
Duración del pulso = 0.80 μ s
Dimensiones del cristal = 10 mm de diámetro
Area de contacto = 28 x 13 mm



4.4.3 Transductor MSWQC de 5 MHz, onda longitudinal



Espectro de frecuencias

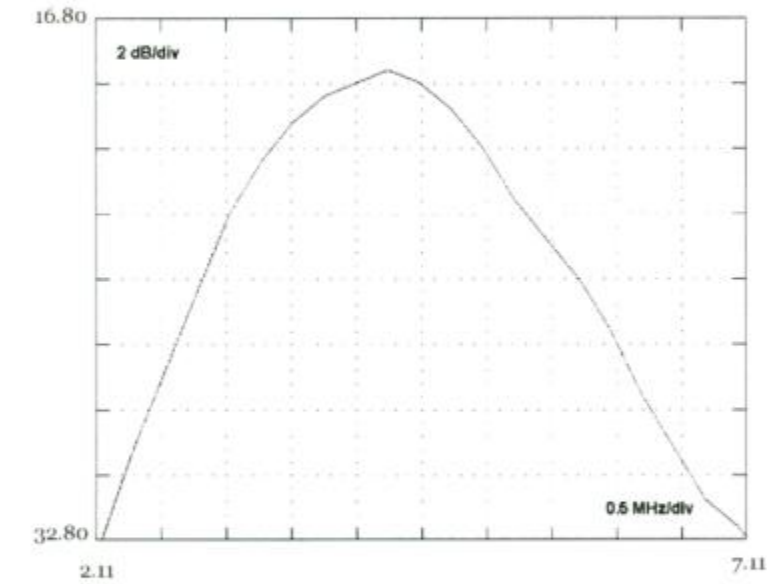


Duración del pulso

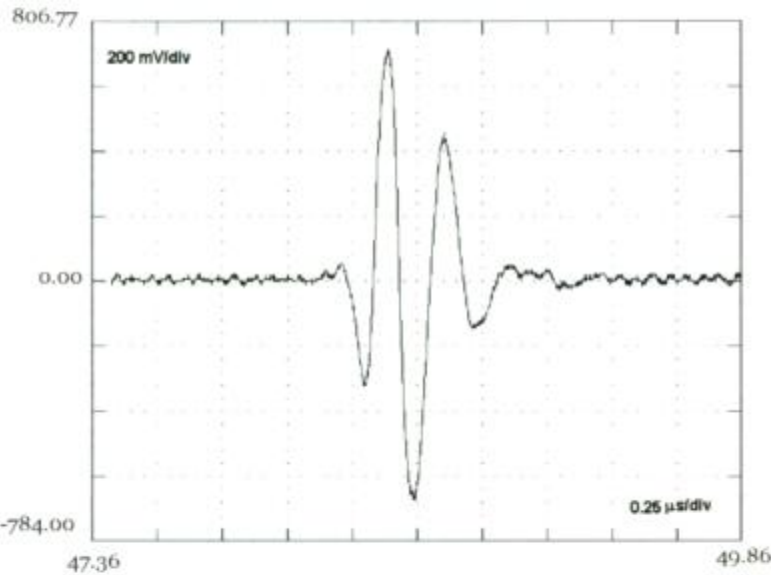
Frecuencia pico = 4.41 MHz
Frecuencia central = 4.32 MHz
Ancho de banda = 3.01 MHz, 5.63 MHz → 60.65%
Duración del pulso = 0.73 μs
Dimensiones del cristal = 6.4 mm de diámetro
Area de contacto = 8 mm



4.4.4 Transductor MSWS de 5 MHz, onda longitudinal

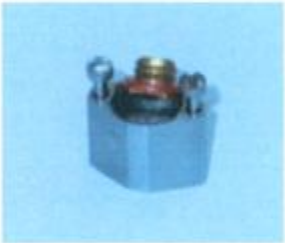


Espectro de frecuencias



Duración del pulso

Frecuencia pico = 4.40 MHz
Frecuencia central = 4.40 MHz
Ancho de banda = 3.01 MHz , 5.78 MHz → 63.02%
Duración del pulso = 0.53 μs
Dimensiones del cristal = 6.4 mm de diámetro
Area de contacto = 7 mm



4.5 Calibración general del equipo [31]

4.5.1 Palpadores normales

Cuando el equipo ultrasónico se encuentra en régimen de funcionamiento, se conecta el palpador y se procede de la siguiente forma:

- Se fija la escala en el valor inmediatamente mayor al espesor que se ensaye.
- Se apoya el palpador sobre cualquiera de los bloques patrón, con un medio de acople, ejerciendo la presión necesaria para conseguir estabilidad en la señal.
- Actuando sobre el mando de la base de tiempo del equipo, se ajusta la distancia entre dos ecos de fondo sucesivos a partir del primer eco de manera que sea igual al espesor del bloque utilizado.
- Si la distancia entre ecos de fondo es correcta, pero no coincide con las indicaciones de la escala, actuando sobre el mando de desplazamiento de la base de tiempo del equipo, se efectúa el corrimiento hasta lograr la coincidencia de alguno de ellos con el verdadero valor correspondiente de la escala, de forma de abarcar en la pantalla del equipo, la zona que se desea estudiar en la pieza. En la figura siguiente se muestra un ejemplo de calibración de este tipo.

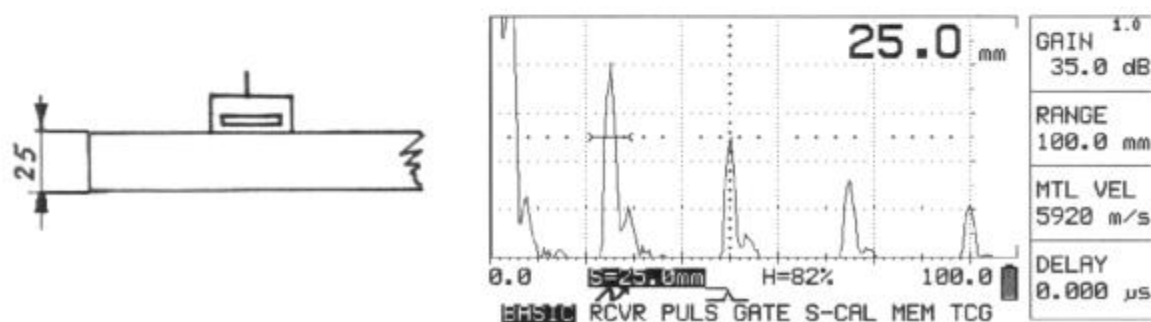


Fig. 4.4 Calibración realizada sobre el bloque patrón V1 (transductor normal de 4 MHz)

4.5.2 Palpadores angulares

- En este caso, la lectura en la pantalla representa la distancia entre el punto de salida del haz y el reflector, medida sobre la trayectoria del haz ultrasónico.
- Se coloca el palpador sobre la ranura del bloque V1 con el haz ultrasónico orientado hacia la cara curva, según se indica en la figura 4.5, se desplaza hacia atrás y hacia adelante hasta obtener en la pantalla el eco de altura máxima.
- Para calibrar la base de tiempo en distancia, se hace coincidir el primer eco con el número de divisiones que representan 100 mm en la escala de la pantalla. El segundo eco de fondo se hace coincidir con el número de divisiones que representan 200 mm en la misma escala.
- El retardo en el suplemento de plástico queda indicado por la distancia entre el borde inicial del pulso de entrada y el cero de la escala. Para determinar su valor, se desplazan los ecos hacia la derecha hasta hacer coincidir el borde inicial del pulso de entrada con el cero de la escala y se lee el desplazamiento sufrido por el primer eco de fondo con respecto a la división correspondiente a 100 mm.
- Para la determinación del punto índice del transductor (punto de salida del haz) se coloca el palpador sobre la ranura del bloque con el haz ultrasónico orientado hacia la cara curva, según la figura, se desplaza hacia atrás y adelante ubicándolo hasta conseguir en la pantalla el eco de altura máxima. En la posición de eco máximo se marca en el palpador el punto que coincida con la ranura del bloque patrón.
- Para la verificación del ángulo de refracción se ubica el palpador en una posición tal como para que se reciba la señal reflejada del reflector elegido en el bloque patrón correspondiente, de acuerdo con lo siguiente: para palpadores cuyo ángulo esté comprendido entre 35 y 60 grados, el haz ultrasónico se orienta hacia el inserto de plástico; si el ángulo está comprendido entre 60 y 75 grados el haz se orienta hacia el inserto de plástico también y si el ángulo está comprendido entre 75 y 80 grados el haz se debe orientar hacia el orificio de 1,5 mm de diámetro. En la posición que corresponda, se

desplaza el palpador hacia delante y hacia atrás ubicándolo hasta conseguir en la pantalla el eco de altura máxima; en este punto se verifica el ángulo de refracción utilizando la posición grabada en el palpador. Si se requiere de una verificación rápida, con una discrepancia de $\pm 3^\circ$, ésta puede efectuarse por interpolación visual entre las marcas de referencia grabadas en el bloque patrón. Para una medición precisa con una discrepancia de $\pm 1,5^\circ$, la posición marcada en el palpador se toma con respecto a una de las caras de un extremo del bloque; si se conoce la posición del agujero empleado como reflector, el ángulo puede verificarse por trigonometría. En los palpadores especiales (mayores de 70 grados) los ángulos grabados pueden no ser muy exactos, por ello se recomienda que el ángulo medio se registre o se grave en el palpador y se lo reemplace en verificaciones posteriores y en la representación gráfica de los defectos.

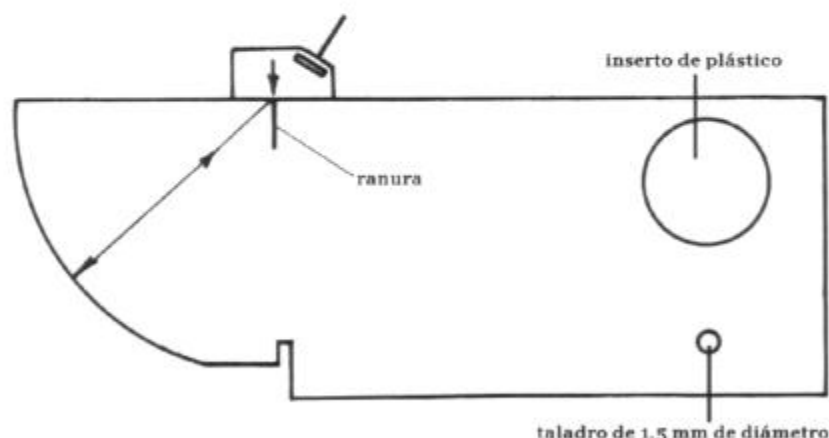


Fig. 4.5 Calibración de un transductor angular con el bloque V1.

A) Determinación de la isobara de -6 dB

El ángulo de divergencia nominal de un palpador puede calcularse sin dificultad con lo que teóricamente se conoce como límites del haz. Sin embargo en problemas de determinación precisa del tamaño de reflectores hay que conocer experimentalmente los límites del haz para cada palpador concreto que se utilice. El límite práctico del haz se considera que está en la isobara de -6 dB es decir: en una línea alrededor del eje cuya presión acústica está 6 dB por debajo de la máxima a esa distancia en el eje del haz. Para la mayoría de las aplicaciones es suficiente conocer 4 puntos de la isobara: dos en el plano horizontal y dos en el vertical.

En la figura 4.6 se indica la posición del palpador respecto del reflector. La determinación horizontal se hará como sigue:

- En una posición tal como la 1 se busca el eco máximo del reflector.
- Se desplaza el palpador hacia la posición 2. El eco no disminuirá hasta que el haz empiece a salir del reflector. Mover hasta que el eco se haya reducido en 6 dB respecto del máximo. Esta traslación del palpador conviene hacerla con ayuda de una regla para garantizar en lo posible la precisión.
- Tomar la distancia a: la diferencia a-b (b profundidad del taladro) será la semiapertura del haz a la distancia que esté el taladro.
- El proceso se repite exactamente igual por el otro lado (posiciones 3 y 4) para determinar la otra semiapertura que en general, deberá ser igual a la anterior.

En la figura 4.7 se indica las posiciones del palpador para hacer la determinación vertical, cuyas etapas son las siguientes:

- Desde la posición 1 se detecta el eco máximo del taladro.
- Se mueve el palpador hacia delante (posición 2) hasta que el eco haya caído 6 dB por debajo del obtenido en 1.
- La diferencia en mm entre las posiciones 1 y 2 nos dará la distancia n.
- Ahora se mueve el palpador hacia la posición 3 hasta obtener otro nuevo eco 6 dB inferior al obtenido en 1.
- La diferencia en mm entre las posiciones 1 y 3 nos dará la distancia m.

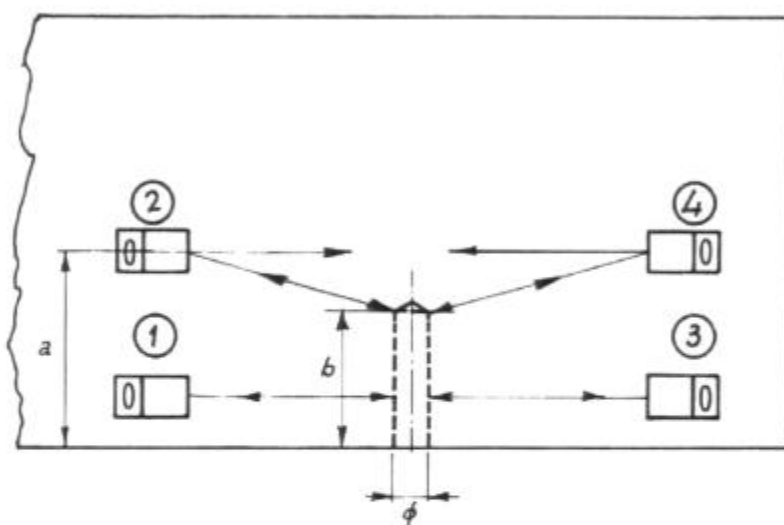


Fig. 4.6 Determinación de la apertura horizontal del haz ultrasónico.

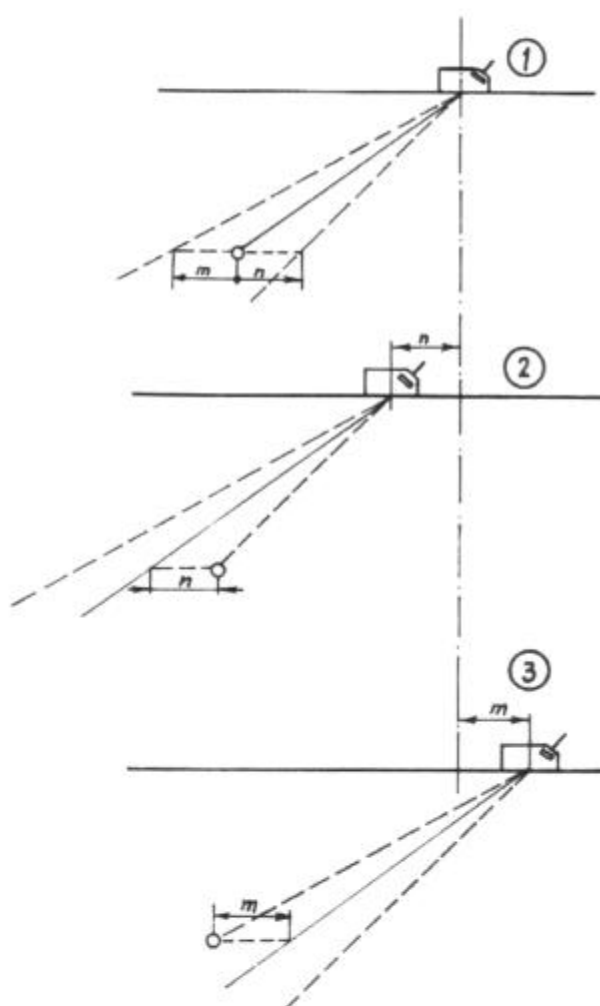


Fig. 4.7 Determinación de la apertura vertical del haz ultrasónico.

4.5.3 Calibración del equipo para las técnicas empleadas

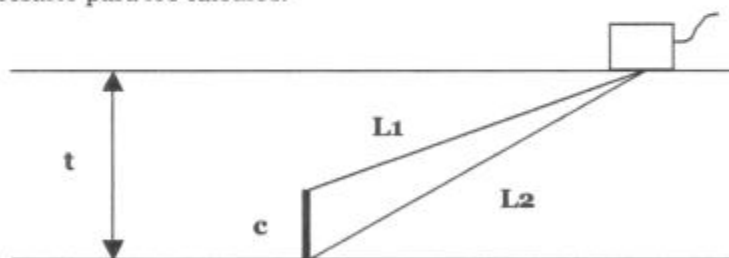
Todos los pasos de calibración son similares a los anteriores, con la única diferencia de que se ha adaptado a la geometría de cada pieza así como del método empleado. En todo momento se seguirá el siguiente procedimiento:

- El primer paso a seguir es determinar el punto índice del palpador a emplear ya que es necesario conocerlo con exactitud para indicar sobre la probeta el punto donde se hizo la lectura. Para eso se debe realizar lo indicado en el punto 4.6 para palpadores angulares y se debe repetir cada vez que se cambie el transductor o de técnica.
- Una vez determinado el punto índice se calibra el equipo con la velocidad del material a estudiar. Para ello se coloca el palpador en una determinada posición de la probeta donde se logre obtener una amplitud máxima de la señal (por lo general se calibra a uno o dos pasos desde la esquina de la probeta o con el espesor de la misma) y en ese mismo punto se calibra (con el zero o delay) la base de tiempos para que dicha señal coincida con el camino sónico recorrido.
- Para los puntos anteriores es necesario contar con un mecanismo que permita alinear bien el o los transductores para que no hayan cambios en el máximo de la señal obtenida y para que permita mover el palpador con más precisión. En el caso de la técnica de tandem, el mismo mecanismo de sujeción de los palpadores permite que estos se encuentren en la posición correcta.
- Una vez calibrado el equipo se procede a observar el comportamiento de la señal al hacer incidir el haz sobre la discontinuidad. En ese momento se procede a identificar el eco difractado en la punta de la ranura el cual se maximiza hasta alcanzar el 80% de la altura total de pantalla y/o el de reflexión directa ubicado en la base de la ranura; para llevar la señal difractada a ese nivel se aumenta o disminuye la ganancia.
- A partir del máximo (siempre hablando del eco de difracción) se toman los valores de camino sónico recorrido y amplitud para los casos en que se disminuyen los 6, 12 y 20 dB, tanto de un lado como del otro a partir de dicho máximo y marcando cada posición sobre la probeta. Dependiendo de la técnica se deberán tomar también los datos de posición del transductor y del eco de reflexión directa.
- Para facilitar el manejo de datos se hace la recopilación en una planilla de cálculo (por ejemplo Excel donde además se pueden llevar a cabo los cálculos necesarios como se indican en el apartado 4.5.
- Las diferentes lecturas deben realizarse tanto del lado de la ranura como del lado opuesto de la misma y en algunos casos, desde perspectivas opuestas en un mismo lado ya que para el ultrasonido podría ser diferente ver una determinada ranura desde diferentes ángulos y posiciones.
- Para el caso de la técnica delta, lo que se hace es maximizar la señal moviendo uno de los dos transductores en un espesor conocido, además de que se deben verificar los pasos anteriores.

4.6 Técnicas de dimensionado empleadas

4.6.1 Método A (tiempo relativo de vuelo)

En este método se deben tener en cuenta no sólo el eco de difracción sino que también el eco de reflexión directa para cada una de las tres posiciones (-6, -12 y -20 dB) a partir del máximo obtenido, tanto a un lado como al otro desde el máximo. El objetivo es realizar las lecturas de camino sónico recorrido (L_1 y L_2) para cada una de las señales antes mencionadas. Cada posición la determina el punto índice del transductor y debe ser marcada únicamente con el objetivo de ubicarla geométricamente sobre la probeta. Posteriormente y con ayuda del programa Excel se realizan los cálculos necesarios para obtener por simple trigonometría, la dimensión de la ranura (c). Esta técnica no permite realizar lecturas desde el lado de la ranura porque no se obtiene un eco de reflexión directa, necesario para los cálculos.



L_1 = eco difractado en la punta de la ranura [mm]
 L_2 = eco de reflexión directa [mm]
 t = espesor de probeta [mm]
 c = dimensión de la ranura [mm]

Fig. 4.8 Esquema empleado en las mediciones hechas con el método A.

$$\text{ec. 4.5} \quad L_2^2 - t^2 = L_1^2 - (t - c)^2$$

$$\text{ec. 4.6} \quad c = t - (L_1^2 + t^2 - L_2^2)^{0.5}$$

únicamente para el lado opuesto de la ranura

4.6.2 Método B (tiempo absoluto de vuelo)

Esta otra modalidad de toma de datos tiene en cuenta únicamente la señal difractada obtenida desde dos posiciones distintas. En este caso es de mucha importancia que la exactitud con que se mida la diferencia de distancias entre una y otra posición ya que pequeñas fluctuaciones hacen que el dimensionamiento sea equivocado. Por lo tanto el dato más importante es el de x y no de la posición relativa del palpador en la probeta. La ventaja de esta técnica es que se puede emplear tanto del lado opuesto como del lado de la ranura y en todos los casos es necesario marcar (con el punto índice) la posición donde se realiza la lectura.

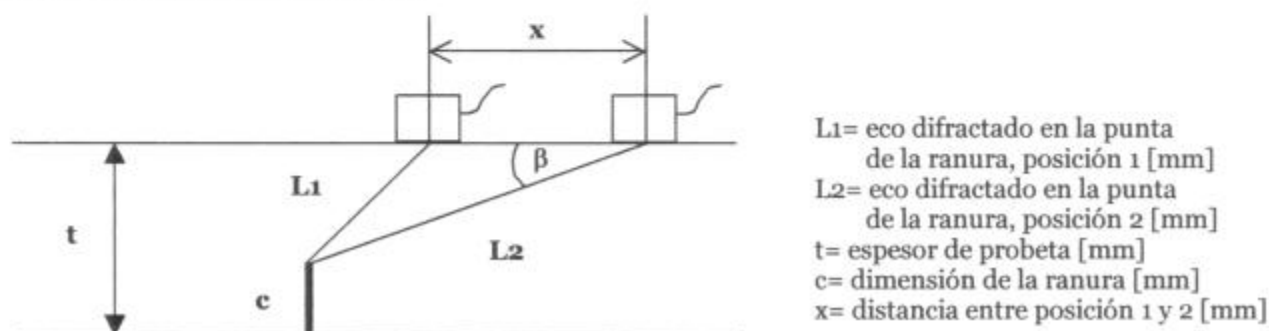


Fig. 4.9 Esquema empleado en las mediciones hechas con el método B.

$$\text{ec. 4.7} \quad L_1^2 = L_2^2 + x^2 - 2 * L_2 * x * \cos \beta$$

$$\text{ec. 4.8} \quad \beta = \cos \left(\frac{L_1^2 - L_2^2 - x^2}{-2 * L_2 * x} \right)^{-1}$$

$$\text{ec. 4.9} \quad c = t - \text{sen}(\beta) * L_2$$

lado opuesto de la ranura

$$\text{ec. 4.10} \quad c = \text{sen}(\beta) * L_2$$

lado de la ranura

4.6.3 Método C (técnica de tandem, delta o V)

Esta es una técnica que por el modo de recopilar los datos, permite hacer los cálculos tomando en cuenta diferentes puntos de vista. En este trabajo se utilizará la mostrada en la figura donde se distinguen una señal superficial (puede o no verse), un eco de reflexión directa (puede o no verse), las señales difractadas y cambios de modo tal y como se ha descrito en otras partes de este trabajo. En este caso la profundidad de inspección queda determinada por la separación entre los palpadores d y ésta en conjunto con el camino sónico recorrido l determinan la dimensión de la discontinuidad. Con esta

configuración se pueden hacer lecturas desde ambos lados de la ranura y la mayor ventaja que se obtiene es que para obtener la dimensión exacta solamente es necesario un único barrido. No se hace necesario marcar la ubicación de los palpadores respecto de la probeta pero si es condición necesaria que estos se encuentren simétricamente ubicados respecto de la ranura que se esté midiendo. Existen métodos para calcular el mismo dato desde cualquier posición pero en nuestro caso se hará con los palpadores centrados.

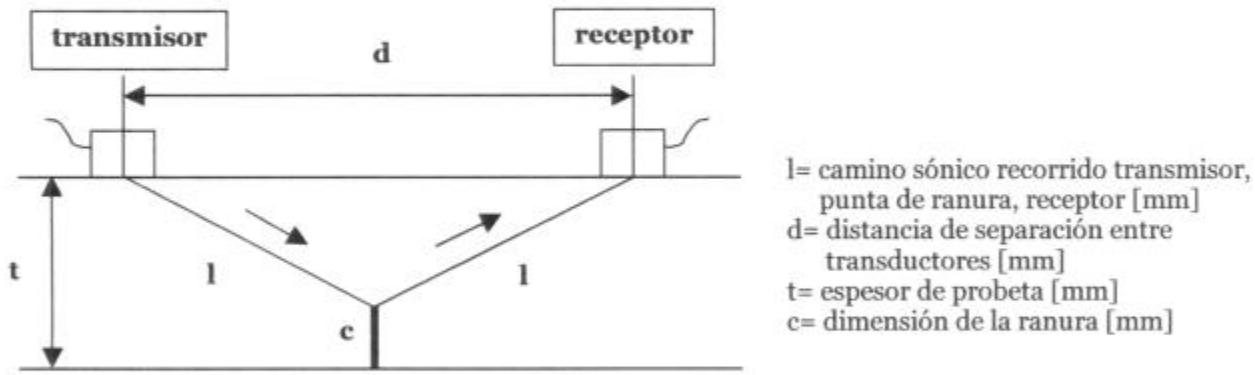


Fig. 4.10 Esquema empleado en las mediciones hechas con el método C.

ec. 4.11

$$c = t - \sqrt{l^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

lado opuesto de la ranura

ec. 4.12

$$c = \sqrt{l^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

lado de la ranura

4.6.4 Método D (tiempo relativo desde dos posiciones para ranuras inclinadas)

Este es un caso especial del método A donde con un mismo transductor se realizan las mediciones como se muestran en la figura siguiente. La ventaja de hacerlo así es que podemos verificar no sólo la dimensión de la ranura sino también su inclinación o ángulo α . Es recomendable que se realice la toma de datos de la forma mostrada ya que las fórmulas están hechas para utilizarlas así, si fuera necesario cambiarla también habría que cambiar las variables de las fórmulas.

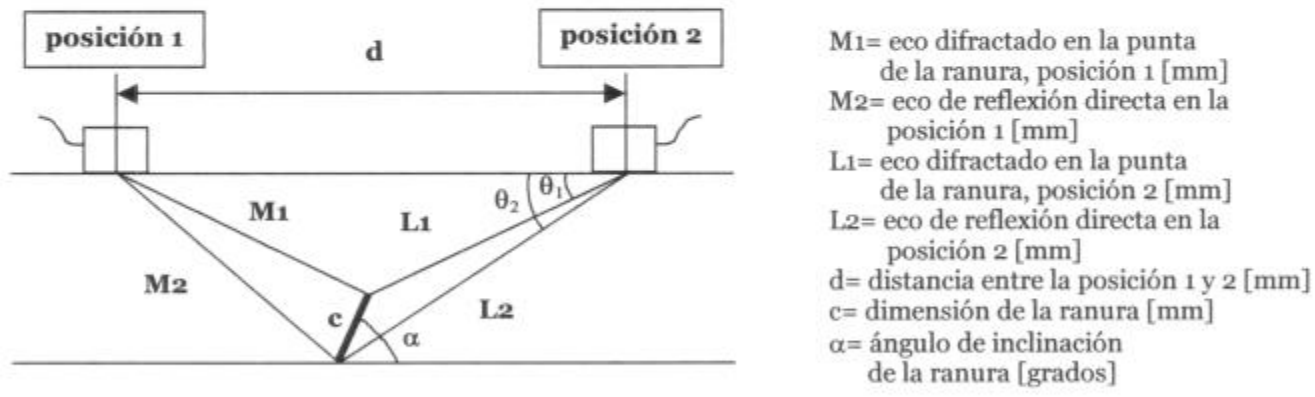


Fig. 4.11 Esquema empleado en las mediciones hechas con el método D.

$$\text{ec. 4.13} \quad M_1^2 = d^2 + L_1^2 - 2 * d * L_1 * \cos \theta_1$$

$$\text{ec. 4.14} \quad M_2^2 = d^2 + L_2^2 - 2 * d * L_2 * \cos \theta_2$$

$$\text{ec. 4.15} \quad c = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 - 2 * L_1 * L_2 * \cos(\theta_2 - \theta_1)}$$

$$\text{ec. 4.16} \quad \frac{\sin(\alpha - \theta_2)}{L_1} = \frac{\sin(\theta_2 - \theta_1)}{c}$$

4.7 Tratamiento de errores experimentales [32]

La estadística en los ensayos no destructivos al igual que en otras áreas de la ingeniería juega un papel muy importante, como una herramienta que ayuda a evaluar más acertadamente las mediciones realizadas con las diferentes técnicas existentes.

Durante las inspecciones realizadas con estos ensayos se cometen dos tipos de errores: los sistemáticos y los aleatorios.

4.7.1 Errores sistemáticos

Son errores que se repiten constantemente en el transcurso de un experimento y que afectan a los resultados finales siempre en el mismo sentido. Una vez que un error sistemático ha sido identificado y cuantificado es posible eliminar sus efectos. Se pueden distinguir varias fuentes de errores sistemáticos:

- Errores de calibración o errores de cero de los aparatos de medida.
- Condiciones experimentales no apropiadas.
- Fórmulas o modelos aproximados.

4.7.2 Errores aleatorios

Como su nombre lo indica, son aquellos que provienen de muchos orígenes: humanos, técnicos, ambientales, etc; los cuales son muy difíciles de evaluar con exactitud. Por más cuidadoso que sea un inspector, siempre habrá un cierto grado de error inducido por factores aleatorios y por causas sistemáticas. Este tipo de errores pueden ser evaluados empleando los métodos matemáticos estadísticos en donde cada error se observa como un evento que posee una probabilidad de que se presente.

Una de las primeras magnitudes que se deben tener en cuenta es el promedio del valor medido en cada uno de los casos:

$$\text{ec. 4.17} \quad X_n = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

En la práctica es difícil establecer que número de mediciones son suficientes para acercarse al valor real, porque siempre existirá un pequeño margen de error en éstas que se distanciará del valor real y para responder a esta pregunta debemos partir de cuál es la exactitud que deseamos obtener con las mediciones y cuál es la precisión del instrumento con la cual vamos a tomar las lecturas. De aquí se concluye obviamente, que el grado de exactitud de nuestras mediciones no puede ser inferior a la precisión del instrumento empleado. El grado de dispersión de los datos, nos deja entrever la precisión del instrumento empleado y de la medición en sí. A medida que la dispersión aumenta, disminuye la precisión y viceversa. Para evaluar la precisión en un número finito de mediciones se dispone de una cantidad llamada "desviación estándar ajustada":

$$\text{ec. 4.18} \quad s = \sqrt{\frac{n\sigma^2}{(n-1)}} \quad \text{donde} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - X)^2}{n}}$$

Y la tercera magnitud para evaluar el error en las mediciones se llama error estándar ajustado S , el cual involucra el número de mediciones:

$$\text{ec. 4.19} \quad S = \frac{s_n}{\sqrt{n}}$$

Además, para nuestro caso concreto, tenemos que determinar la longitud de una ranura de forma indirecta, o sea, aplicando una cierta fórmula (como se mostró anteriormente) en cada método utilizado. Una vez que conocemos la relación funcional de la dimensión de la ranura c con las variables medidas x , tal y como se representa a continuación

$$\text{ec. 4.20} \quad c = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

entonces podremos conocer c midiendo $x_1, x_2, \dots, x_n$. Pero la cuestión es cómo estimar el error con que se conoce c . Lo anterior se resuelve cuando se miden los errores $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ con que las demás magnitudes han sido medidas. Por lo tanto, vamos a definir el error relativo ε de una magnitud x_i como se muestra a continuación:

$$\text{ec. 4.21} \quad \varepsilon(x_i) = \frac{\Delta x_i}{x_i}$$

Si los errores relativos de las variables $x_1, x_2, \dots, x_n$ son pequeños frente a la unidad, podemos estimar el error Δc de la siguiente forma:

$$\text{ec. 4.22} \quad \Delta c = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{x_i} * \Delta x_i$$

y definiendo la expresión anterior en un desarrollo de serie de Taylor con todos los términos positivos, tenemos el siguiente resultado importante:

$$\text{ec. 4.23} \quad \Delta c = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_{x_i}^2 * (\Delta x_i)^2}$$

El último parámetro por definir y que se utilizará para medir la precisión y confiabilidad de cada una de las técnicas empleadas se llama error relativo porcentual, el cual se define de la siguiente forma:

$$\text{ec. 4.24} \quad \% \text{error} = \frac{\text{valor real} - \text{valor medido}}{\text{valor real}} * 100$$

Ahora bien, empleando los puntos antes citados, en el anexo No. 2 se muestra la forma en que se han calculado los errores relativos para cada uno de los métodos empleados en el dimensionado de cada una de las ranuras.

4.8 Ensayo de flexión

El objetivo del ensayo de flexión es observar el comportamiento de la señal difractada en la punta de las fisuras hechas por fatiga. Lo anterior se debe al hecho de que las fisuras se encuentran muy cerradas y son transparentes al ultrasonido; o mejor dicho, el ultrasonido sí detecta perfectamente la discontinuidad pero no así la señal difractada. Entonces se decidió someter a las dos probetas (#7 y #8) de acero a un ensayo de flexión en tres puntos y al mismo tiempo se observaría el comportamiento de las señales con el equipo de ultrasonido. Es necesario resaltar que las probetas fueron hechas en otro momento y no tenían las dimensiones exactas para este ensayo según la norma ASTM E 1290-93 [33], pero como lo que se perseguía no era la obtención de resultados numéricos sino más bien cualitativos, se adaptó el equipamiento para la geometría existente y se obtuvieron algunas imágenes y datos de importancia que pueden ayudar a mejorar mediciones posteriores. El montaje del equipo se muestra en la figura siguiente.



Fig. 4.12 Mecanismo de flexión en tres puntos.



Fig. 4.13 Detalles de la colocación del transductor y del extensómetro
El cual medirá la apertura de la fisura conforme aumenta la carga.

El equipo se manejó en forma manual controlando la aplicación de la carga para poder detener la máquina en el momento en que se comienza a notar algunos cambios en la señal ultrasónica. Previo al ensayo, se calibra el equipo ultrasónico utilizando la probeta No. 2 con la ranura **b** (13.04 mm) de forma tal que la ganancia sea adecuada para ver la señal difractada con una altura aproximada al 80% de la altura total de pantalla. Y una vez situada la probeta sobre los soportes se coloca el transductor en una posición que permita apreciar en eco de reflexión directa de la fisura. En el instante donde se observe un aumento de amplitud de la señal que se supone sea la de difracción, se toma la lectura de carga y medición del extensómetro donde este último es el dato de mayor importancia ya que nos proporciona la apertura de la fisura en ese preciso momento. Posteriormente se toman otros puntos más pero que no son tan importantes como el primero.

Lo que se quiere es obtener una medición de apertura de fisura en la punta a partir de la cual la señal de difracción se logre diferenciar respecto al ruido (pasto), gracias a un aumento de su amplitud. Para calcular la apertura en la punta de la fisura o CTOD (del inglés crack tip opening displacement) a partir de la lectura del extensómetro se emplean las fórmulas mostradas a continuación [34].

$$\text{ec. 4.25} \quad \delta = \delta_e + \delta_p$$

$$\text{ec. 4.26} \quad \delta_e = \frac{K^2 * (1 - \nu^2)}{2 * \sigma_{ys} * E}$$

$$\text{ec. 4.27} \quad K = \frac{P * F(a/w)}{B * \sqrt{w}}$$

ec. 4.28

$$F(a/w) = 11.6 * (a/w)^{1/2} - 18.4 * (a/w)^{3/2} + 87.2 * (a/w)^{5/2} - 150.4 * (a/w)^{7/2} + 154.8 * (a/w)^{9/2}$$

$$\text{ec. 4.29} \quad \delta_p = \frac{0.4 * (w - a_0) * V_p}{(0.4 * w + 0.6 * a_0 + z)}$$

$$\text{ec. 4.30} \quad V_p = V_g - V_e$$

$$V_e = \left(\frac{24 * P * (1 - \nu^2) * (1 + 1.7 * (z / w)) * a_0}{B * E * w} \right) * \left(0.76 - (2.28 * a_0 / w) + 3.87 * (a_0 / w)^2 - 2.04 * (a_0 / w)^3 + \frac{0.66}{(1 - (a_0 / w))^2} \right)$$

δ = CTOD= apertura total de la punta de la fisura [mm]

δ_e = apertura debido a la deformación elástica [mm]

δ_p = apertura debido a la deformación plástica [mm]

a = longitud instantánea de la fisura [mm]

a_0 = longitud inicial de la ranura [mm]

z = altura de las cuchillas (espesor) [mm]

B = longitud de la probeta [mm]

w = espesor de probeta [mm]

P = carga aplicada [N]

K = factor de intensidad de carga [N/mm^{3/2}]

$F(a/w)$ = factor geométrico [adimensional]

ν = relación de Poisson [adimensional]

σ_{ys} = tensión de fluencia [MPa]

E = módulo de Young [N/mm²]

V_p = desplazamiento plástico [mm]

V_g = desplazamiento del extensómetro [mm]

V_e = desplazamiento elástico [mm]

4.9 Construcción de zapatas

De acuerdo a la teoría, lo recomendable para este tipo de ensayos en donde lo que se persigue es estudiar las señales de difracción, es emplear ondas del tipo longitudinal además de un ángulo de incidencia de aproximadamente 65 grados. Debido a lo anterior, fue que se realizó la construcción de dos zapatas para lograr las condiciones mencionadas y de esa forma comparar los diferentes resultados. Para la construcción se empleó una resina acrílica conocida como "plexiglass". Para el trazo de las dimensiones de las zapatas se empleó un programa para diseño (AutoCad) y gracias a este, también se pudo tener en cuenta las posibles reflexiones dentro del plástico y de esta forma darle la forma adecuada. Algunas de las consideraciones importantes a tener en cuenta durante la construcción es que se deben evitar las reflexiones ya que estas pueden interferir de gran manera con otras señales importantes, además el espesor por el que viaja el ultrasonido no debe ser muy grande porque como se trata de un material muy atenuante, puede haber una gran pérdida de energía acústica trayendo como consecuencia una muy baja sensibilidad de ensayo. En las figuras siguientes se muestran todos los detalles de las dos zapatas hechas y en la sección de análisis se presentan otros datos de importancia para tener en cuenta.

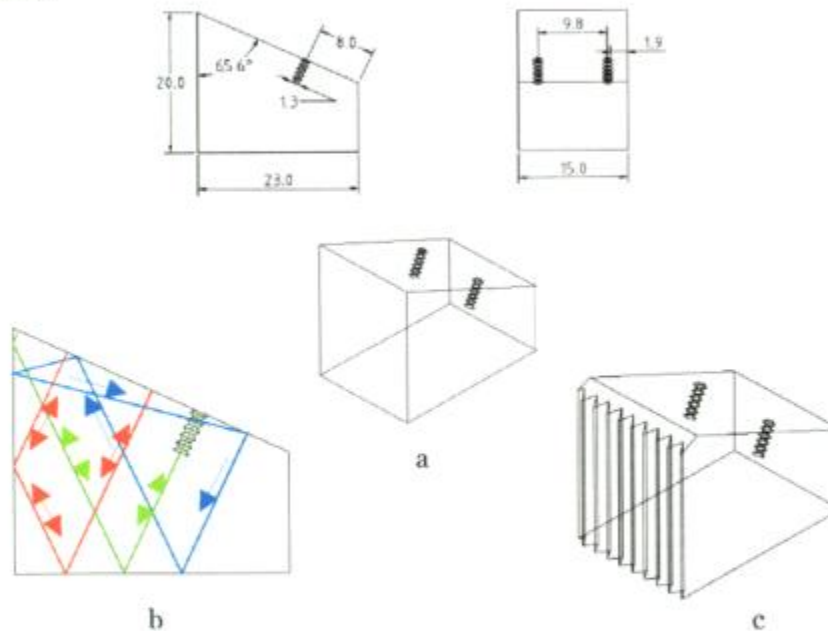


Fig. 4.14 Detalle de la construcción para el transductor MSWS-5: a) dimensiones, b) posibles reflexiones dentro del plástico, c) forma definitiva de la zapata.

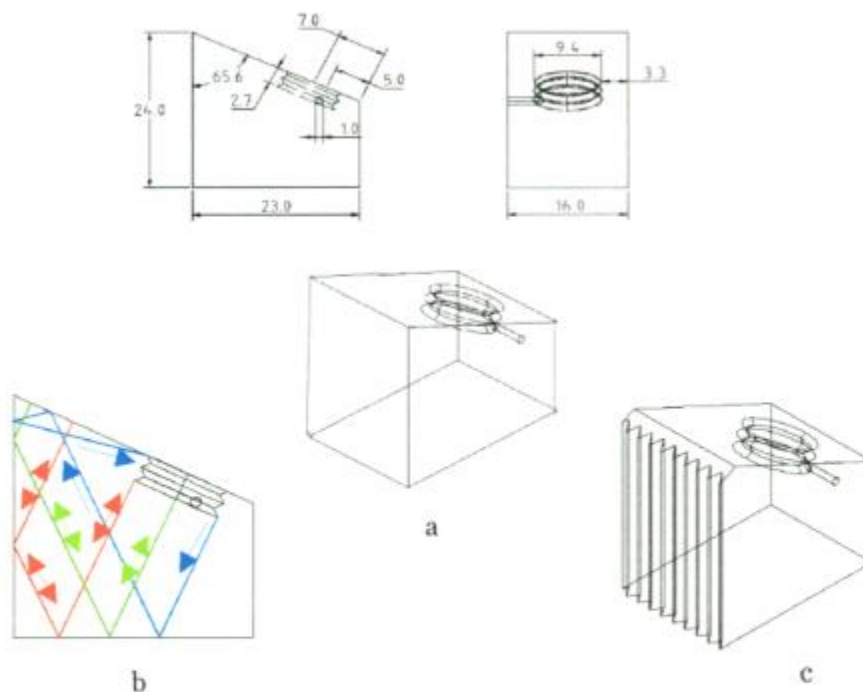


Fig. 4.15 Detalle de la construcción para el transductor MSWQC-5: a) dimensiones, b) posibles reflexiones dentro del plástico, c) forma definitiva de la zapata.

A continuación se muestra la disposición de los equipos y los instrumentos de medición durante los ensayos. En la figura se observa el equipo ultrasónico, los bloques patrón, las probetas, los transductores, los mecanismos de alineamiento de los palpadores, la computadora para la adquisición y análisis de las señales, entre otros.

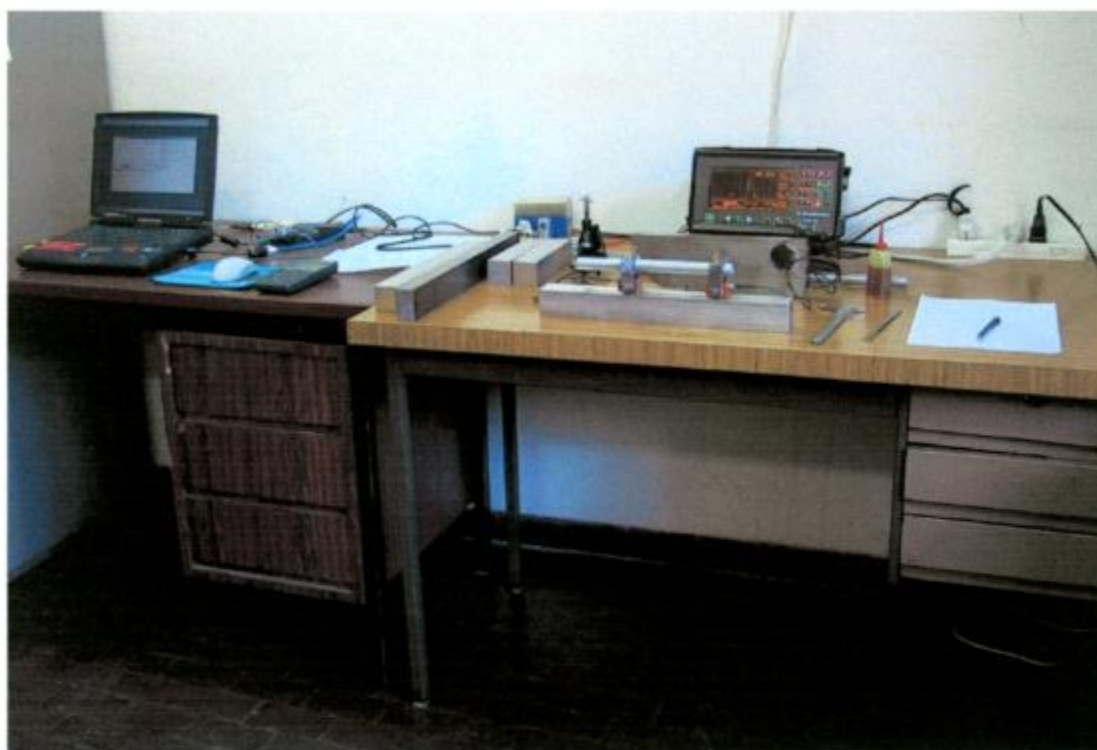
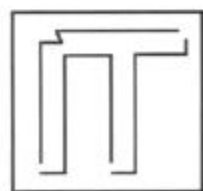


Fig. 4.16 Disposición general del ensayo para el dimensionamiento de discontinuidades.

Resultados Experimentales



Parte V: “Resultados experimentales”

5.1 Resultados cuantitativos de los ensayos

5.1.1 Medición de la atenuación ultrasónica

Material = acero SAE 1010

Tercer eco = 47.0 dB

Distancia recorrida = 155.0 mm

Sexto eco = 56.5 dB

Distancia recorrida = 310.0 mm

Atenuación calculada = 0.01 dB/mm

Material = aluminio puro

Tercer eco = 40.5 dB

Distancia recorrida = 130.9 mm

Sexto eco = 53.0 dB

Distancia recorrida = 261.0 mm

Atenuación calculada = 0.02 dB/mm

5.1.2 Mediciones realizadas con ondas transversales

A continuación se presentan los resultados numéricos de las mediciones llevadas a cabo con las diferentes probetas. El dato no disponible en cada una de ellas se debe a que la geometría de la probeta no permitió realizar la medición, o bien, que la señal no fue del todo satisfactoria para realizar el dimensionamiento.

Tabla 5.1 Resultados obtenidos con la técnica A, lado opuesto a la ranura.

Resultados empleando el transductor MWB45-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	10,21	0,39	4,12
	b	19,80	19,62	0,33	1,31
	c	29,75	29,22	0,25	2,33
2	a	7,06	7,30	0,36	2,84
	b	13,04	12,89	0,48	1,21
	c	20,01	19,26	0,25	3,68
3	20° (pos. 1)	14,80	5,01	0,21	66,13
	20° (pos. 2)	14,80	-	-	-
	80° (pos. 1)	15,00	11,41	0,35	23,94
	80° (pos. 2)	15,00	15,83	0,61	5,55
4	40° (pos. 1)	14,90	24,49	1,18	64,33
	40° (pos. 2)	14,90	2,63	0,41	82,33
	60° (pos. 1)	15,00	5,83	0,33	61,14
	60° (pos. 2)	15,00	22,62	0,84	50,83

Resultados empleando el transductor MWB60-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	-	-	-
	b	19,80	19,37	0,50	2,58
	c	29,75	28,19	0,81	5,79
2	a	7,06	7,14	0,28	0,60
	b	13,04	12,40	0,44	4,99
	c	20,01	18,50	0,68	7,52
3	20° (pos. 1)	14,80	28,77	2,85	94,41
	20° (pos. 2)	14,80	-	-	-
	80° (pos. 1)	15,00	9,64	0,43	35,71
	80° (pos. 2)	15,00	15,90	0,87	5,99
4	40° (pos. 1)	14,90	28,95	1,72	94,29
	40° (pos. 2)	14,90	3,70	0,68	75,14
	60° (pos. 1)	15,00	-	-	-
	60° (pos. 2)	15,00	27,88	2,27	85,85

Resultados empleando el transductor MWB70-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	-	-	-
	b	19,80	-	-	-
	c	29,75	-	-	-
2	a	7,06	7,37	0,24	3,75
	b	13,04	12,81	0,44	1,84
	c	20,01	20,11	1,15	0,54
3	20° (pos. 1)	14,80	13,64	2,87	7,81
	20° (pos. 2)	14,80	-	-	-
	80° (pos. 1)	15,00	10,05	3,86	32,99
	80° (pos. 2)	15,00	20,37	1,65	35,83
4	40° (pos. 1)	14,90	19,16	3,96	28,62
	40° (pos. 2)	14,90	14,40	2,22	3,37
	60° (pos. 1)	15,00	-	-	-
	60° (pos. 2)	15,00	27,99	1,71	86,60

- Dato no disponible

Tabla 5.2 Resultados obtenidos con la técnica B, lado opuesto a la ranura.

Resultados empleando el transductor MWB45-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	10,14	0,90	3,36
	b	19,80	20,68	1,07	4,03
	c	29,75	30,52	1,43	2,01
2	a	7,06	8,57	1,26	20,71
	b	13,04	13,00	0,88	0,42
	c	20,01	21,28	1,43	6,41
3	20° (pos. 1)	14,80	5,06	0,66	65,79
	20° (pos. 2)	14,80	6,57	1,37	55,60
	80° (pos. 1)	15,00	14,62	1,87	2,52
	80° (pos. 2)	15,00	13,91	0,95	7,27
4	40° (pos. 1)	14,90	10,94	1,53	26,59
	40° (pos. 2)	14,90	3,40	1,20	77,21
	60° (pos. 1)	15,00	13,86	0,77	7,63
	60° (pos. 2)	15,00	13,36	1,08	10,93

Resultados empleando el transductor MWB60-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	-	-	-
	b	19,80	20,98	1,27	5,51
	c	29,75	31,56	1,19	5,48
2	a	7,06	5,96	1,54	16,12
	b	13,04	14,64	1,26	12,19
	c	20,01	19,89	1,41	0,57
3	20° (pos. 1)	14,80	5,03	1,47	66,03
	20° (pos. 2)	14,80	6,42	1,79	56,65
	80° (pos. 1)	15,00	15,87	0,86	5,80
	80° (pos. 2)	15,00	13,53	1,43	9,79
4	40° (pos. 1)	14,90	10,57	1,11	29,04
	40° (pos. 2)	14,90	8,47	0,87	43,16
	60° (pos. 1)	15,00	10,58	2,61	29,48
	60° (pos. 2)	15,00	14,81	1,52	1,25

Resultados empleando el transductor MWB70-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	-	-	-
	b	19,80	-	-	-
	c	29,75	-	-	-
2	a	7,06	13,18	3,97	85,61
	b	13,04	14,02	2,05	7,46
	c	20,01	25,47	2,71	27,35
3	20° (pos. 1)	14,80	9,47	4,84	35,98
	20° (pos. 2)	14,80	-	-	-
	80° (pos. 1)	15,00	13,59	1,14	9,38
	80° (pos. 2)	15,00	15,42	1,72	2,79
4	40° (pos. 1)	14,90	8,80	0,88	40,96
	40° (pos. 2)	14,90	8,02	0,95	46,21
	60° (pos. 1)	15,00	17,54	3,68	16,93
	60° (pos. 2)	15,00	12,16	1,21	18,96

- Dato no disponible

Tabla 5.3 Resultados obtenidos con la técnica B, lado de ranura.

Resultados empleando el transductor MWB45-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	-	-	-
	b	19,80	20,30	3,20	2,09
	c	29,75	29,21	1,00	2,38
2	a	7,06	-	-	-
	b	13,04	12,79	0,36	2,01
	c	20,01	19,61	1,18	1,93
3	20° (pos. 1)	14,80	5,27	0,63	64,42
	20° (pos. 2)	14,80	-	-	-
	80° (pos. 1)	15,00	-	-	-
	80° (pos. 2)	15,00	14,09	0,95	6,04
4	40° (pos. 1)	14,90	9,02	0,82	39,49
	40° (pos. 2)	14,90	-	-	-
	60° (pos. 1)	15,00	-	-	-
	60° (pos. 2)	15,00	12,32	0,60	17,90

Resultados empleando el transductor MWB60-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	9,37	0,58	4,44
	b	19,80	17,72	1,58	10,85
	c	29,75	26,68	1,29	10,81
2	a	7,06	7,40	0,82	4,28
	b	13,04	12,45	1,30	4,61
	c	20,01	17,20	2,09	14,02
3	20° (pos. 1)	14,80	6,10	1,12	58,79
	20° (pos. 2)	14,80	-	-	-
	80° (pos. 1)	15,00	13,54	1,95	9,75
	80° (pos. 2)	15,00	13,44	1,05	10,40
4	40° (pos. 1)	14,90	10,35	1,76	30,56
	40° (pos. 2)	14,90	-	-	-
	60° (pos. 1)	15,00	-	-	-
	60° (pos. 2)	15,00	12,73	1,52	15,10

Resultados empleando el transductor MWB70-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	9,37	1,40	4,48
	b	19,80	-	-	-
	c	29,75	-	-	-
2	a	7,06	7,19	1,04	1,20
	b	13,04	12,57	1,09	3,71
	c	20,01	19,74	4,11	1,30
3	20° (pos. 1)	14,80	5,76	0,97	61,07
	20° (pos. 2)	14,80	-	-	-
	80° (pos. 1)	15,00	12,35	1,85	17,66
	80° (pos. 2)	15,00	14,86	1,54	0,97
4	40° (pos. 1)	14,90	9,13	0,96	38,76
	40° (pos. 2)	14,90	-	-	-
	60° (pos. 1)	15,00	-	-	-
	60° (pos. 2)	15,00	12,08	0,81	19,45

- Dato no disponible

Tabla 5.4 Resultados obtenidos con la técnica C, lado opuesto a la ranura.

Resultados empleando el transductor MWB45-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	9,82	0,05	0,06
	b	19,80	-	-	-
	c	29,75	-	-	-
2	a	7,06	7,00	0,05	1,42
	b	13,04	13,07	0,05	0,14
	c	20,01	18,21	0,05	8,94
3	20° (pos. 1)	14,80	6,54	0,05	55,79
	20° (pos. 2)	14,80	6,57	0,05	55,59
	80° (pos. 1)	15,00	-	-	-
	80° (pos. 2)	15,00	-	-	-
4	40° (pos. 1)	14,90	11,78	0,05	20,91
	40° (pos. 2)	14,90	11,78	0,05	20,91
	60° (pos. 1)	15,00	14,96	0,05	0,27
	60° (pos. 2)	15,00	14,94	0,05	0,38

Resultados empleando el transductor MWB60-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	-	-	-
	b	19,80	-	-	-
	c	29,75	-	-	-
2	a	7,06	7,13	0,05	0,42
	b	13,04	13,15	0,05	0,77
	c	20,01	19,28	0,05	3,59
3	20° (pos. 1)	14,80	5,21	0,05	64,80
	20° (pos. 2)	14,80	5,23	0,05	64,67
	80° (pos. 1)	15,00	9,20	0,05	38,64
	80° (pos. 2)	15,00	8,02	0,05	46,52
4	40° (pos. 1)	14,90	15,43	0,05	3,59
	40° (pos. 2)	14,90	15,43	0,05	3,59
	60° (pos. 1)	15,00	17,75	0,05	18,34
	60° (pos. 2)	15,00	18,29	0,05	21,93

Resultados empleando el transductor MWB70-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	-	-	-
	b	19,80	-	-	-
	c	29,75	-	-	-
2	a	7,06	7,30	0,05	2,79
	b	13,04	13,74	0,05	5,27
	c	20,01	19,14	0,05	4,30
3	20° (pos. 1)	14,80	-	-	-
	20° (pos. 2)	14,80	-	-	-
	80° (pos. 1)	15,00	18,55	0,05	23,66
	80° (pos. 2)	15,00	13,72	0,05	8,56
4	40° (pos. 1)	14,90	9,58	0,05	35,71
	40° (pos. 2)	14,90	9,29	0,05	37,64
	60° (pos. 1)	15,00	11,35	0,05	24,32
	60° (pos. 2)	15,00	11,35	0,05	24,32

- Dato no disponible

Tabla 5.5 Resultados obtenidos con la técnica C, lado de ranura.

Resultados empleando el transductor MWB45-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	9,73	0,01	0,86
	b	19,80	19,89	0,01	0,07
	c	29,75	-	-	-
2	a	7,06	-	-	-
	b	13,04	12,77	0,01	2,18
	c	20,01	19,64	0,01	1,78
3	20° (pos. 1)	14,80	-	-	-
	20° (pos. 2)	14,80	-	-	-
	80° (pos. 1)	15,00	14,91	0,01	0,58
	80° (pos. 2)	15,00	14,60	0,01	2,64
4	40° (pos. 1)	14,90	25,97	0,01	74,27
	40° (pos. 2)	14,90	26,79	0,01	79,77
	60° (pos. 1)	15,00	26,38	0,01	75,85
	60° (pos. 2)	15,00	26,38	0,01	75,85

Resultados empleando el transductor MWB60-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	9,79	0,02	0,25
	b	19,80	-	-	-
	c	29,75	-	-	-
2	a	7,06	3,88	0,02	45,36
	b	13,04	10,90	0,02	16,51
	c	20,01	18,98	0,02	5,09
3	20° (pos. 1)	14,80	-	-	-
	20° (pos. 2)	14,80	-	-	-
	80° (pos. 1)	15,00	15,60	0,02	4,02
	80° (pos. 2)	15,00	15,62	0,02	4,14
4	40° (pos. 1)	14,90	15,17	0,02	1,78
	40° (pos. 2)	14,90	15,17	0,02	1,78
	60° (pos. 1)	15,00	14,31	0,02	4,61
	60° (pos. 2)	15,00	14,31	0,02	4,61

Resultados empleando el transductor MWB70-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
1	a	9,90	-	-	-
	b	19,80	-	-	-
	c	29,75	-	-	-
2	a	7,06	7,04	0,02	0,86
	b	13,04	13,55	0,02	3,84
	c	20,01	20,83	0,02	4,17
3	20° (pos. 1)	14,80	-	-	-
	20° (pos. 2)	14,80	-	-	-
	80° (pos. 1)	15,00	16,19	0,02	7,93
	80° (pos. 2)	15,00	16,26	0,02	8,40
4	40° (pos. 1)	14,90	11,68	0,02	21,62
	40° (pos. 2)	14,90	12,20	0,02	18,15
	60° (pos. 1)	15,00	14,77	0,02	1,53
	60° (pos. 2)	15,00	14,33	0,02	4,46

- Dato no disponible

Tabla 5.6 Resultados obtenidos con la técnica D, lado opuesto de la ranura.

Resultados empleando el transductor MWB45-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
3	20°	14,80	13,26	0,11	10,37
	80°	15,00	14,00	0,10	6,65
4	40°	14,90	13,71	0,08	8,00
	60°	15,00	14,94	0,07	0,40

Resultados empleando el transductor MWB60-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
3	20°	14,80	13,94	0,12	5,83
	80°	15,00	13,69	0,17	8,75
4	40°	14,90	13,83	0,10	7,16
	60°	15,00	14,52	0,13	3,21

Resultados empleando el transductor MWB70-N4

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
3	20°	14,80	13,68	0,15	7,55
	80°	15,00	13,77	0,22	8,23
4	40°	14,90	13,92	0,15	6,56
	60°	15,00	13,09	0,18	12,73

- Dato no disponible

Para una mejor comprensión de los resultados obtenidos mediante cálculo, se han adjuntado algunas de las imágenes adquiridas durante los diferentes ensayos llevados a cabo ya que importante saber cómo pueden presentarse las diversas señales según las teorías de reflexión. Como primer caso tenemos las señales que son resultado de la aplicación de las técnicas A, B y D desde el lado opuesto de la ranura. En esta se van a distinguir dos ecos principales como se puede apreciar en la figura 5.1: uno proveniente del borde superior de la ranura conocido como señal de difracción (1) y otro de reflexión directa en la base de dicha ranura (2). Además de éstas dos señales pueden aparecer otras como lo pueden ser algunos cambios de modo o reflexiones debidos a la divergencia del haz que no serán tomadas en cuenta para dimensionar las discontinuidades. Se debe agregar además que los barridos llevados a cabo desde el lado de la ranura puede que no se observe el eco de reflexión directa y además pueden aparecer otras como las señales superficiales pero esto depende de la técnica y de los palpadores empleados.

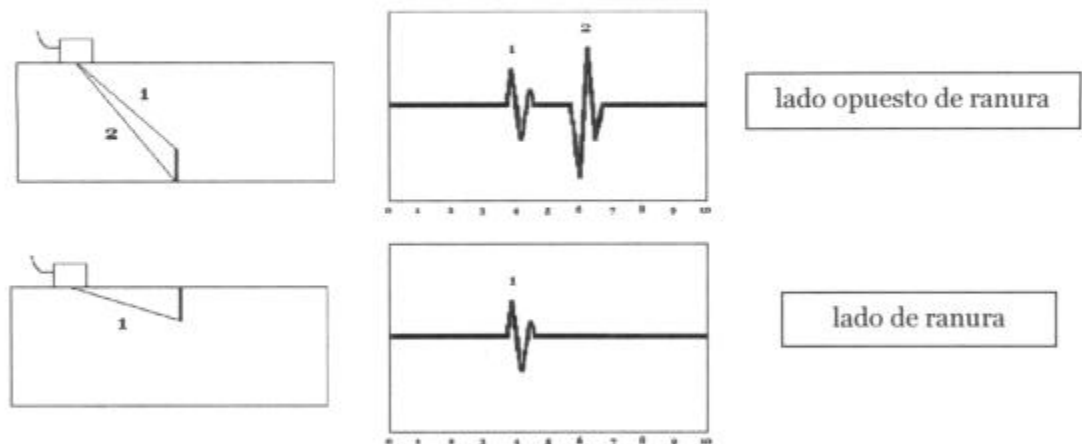


Fig. 5.1 Señales características de las técnicas A, B y D; se distinguen dos ecos principales: 1 = el de difracción y 2 = el de reflexión directa.

Para la técnica C además de la señal difractada, la de reflexión directa y otros cambios de modo puede aparecer también una señal superficial y que por tener el menor recorrido sónico (distancia entre los transductores) aparece antes que todas las señales ya mencionadas (figura 5.2). Algunas técnicas emplean esta señal de superficie para realizar el dimensionado dejando de lado las señales de difracción, por este motivo no se ha empleado en este trabajo. Es necesario destacar que también desde el lado de ranura es posible no tener el eco de reflexión directa y que la señal de superficie puede aparecer también cuando se trabaja con la técnica de pulso eco del lado de ranura como se mencionó anteriormente y con transductores cuyo ángulo de incidencia es bastante alto (mayor de 60°).

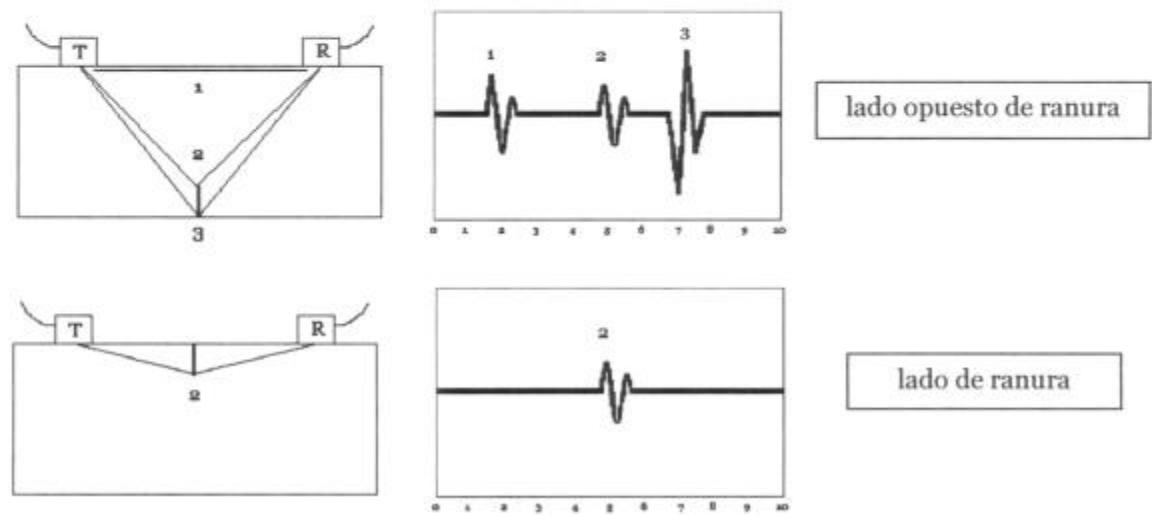


Fig. 5.2 Señales características de la técnica C; se distinguen tres ecos principales: 1 = señal superficial, 2 = de difracción y 3 = reflexión directa.

A) Señales observadas en las probetas No. 1 y No. 2



Fig. 5.3 Señal característica proveniente del lado opuesto de la ranura, técnicas A y B, transductores MWB-45 de 4 MHz, onda transversal.

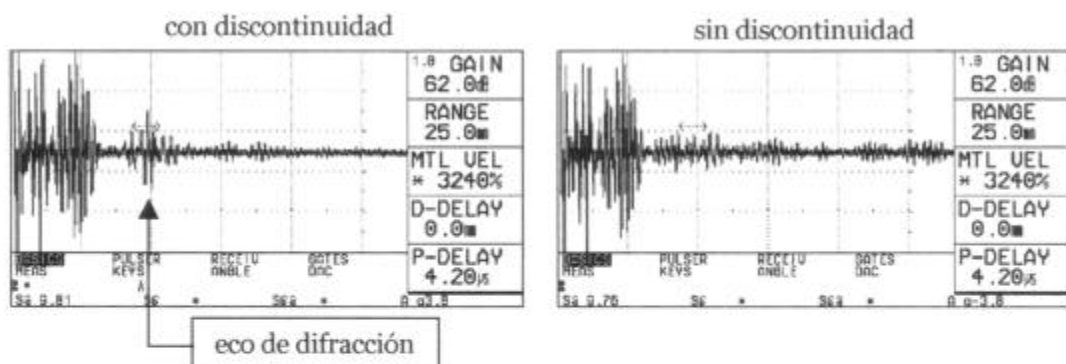


Fig. 5.4 Señal característica proveniente del lado de la ranura, técnica B, transductores MWB-45 de 4 MHz, onda transversal.

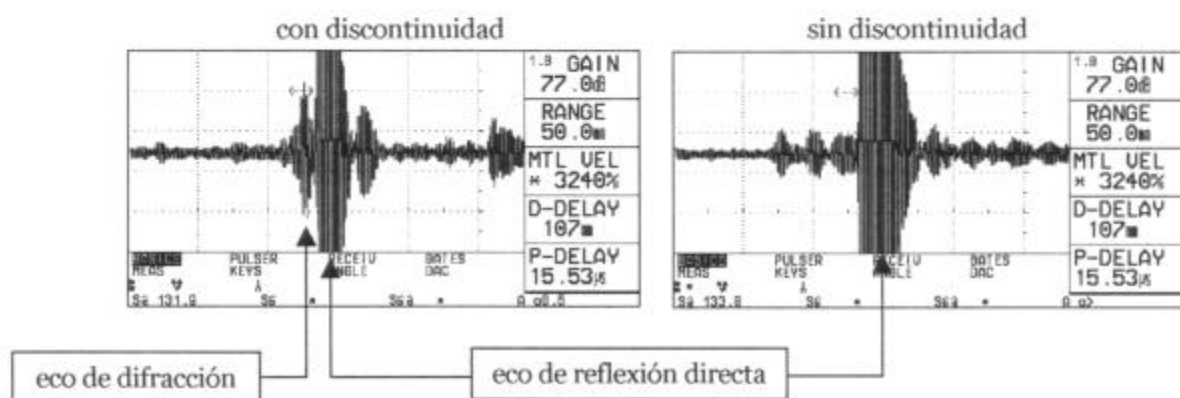


Fig. 5.5 Señal característica proveniente del lado opuesto de la ranura, técnica C, transductores MWB-70 de 4 MHz, onda transversal.

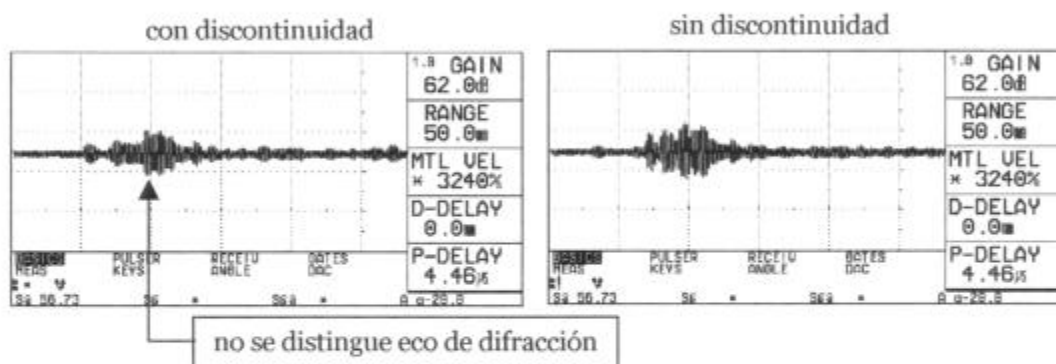


Fig. 5.6 Señal característica proveniente del lado de la ranura, técnica C, transductores MWB-45 de 4 MHz, onda transversal.

B) Señales observadas en las probetas No. 3 y No. 4

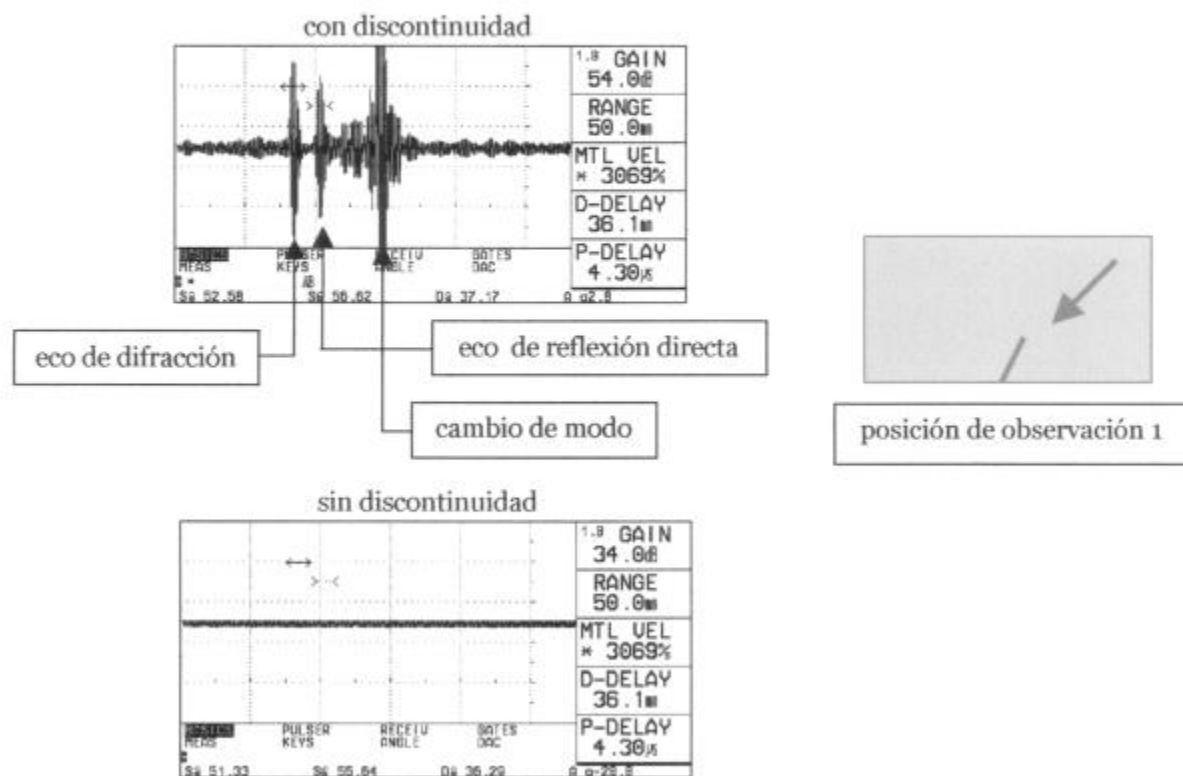


Fig. 5.7 Señal característica proveniente del lado opuesto de ranura, posición 1, técnicas A, B y D, transductores MWB-45 de 4 MHz, onda transversal.

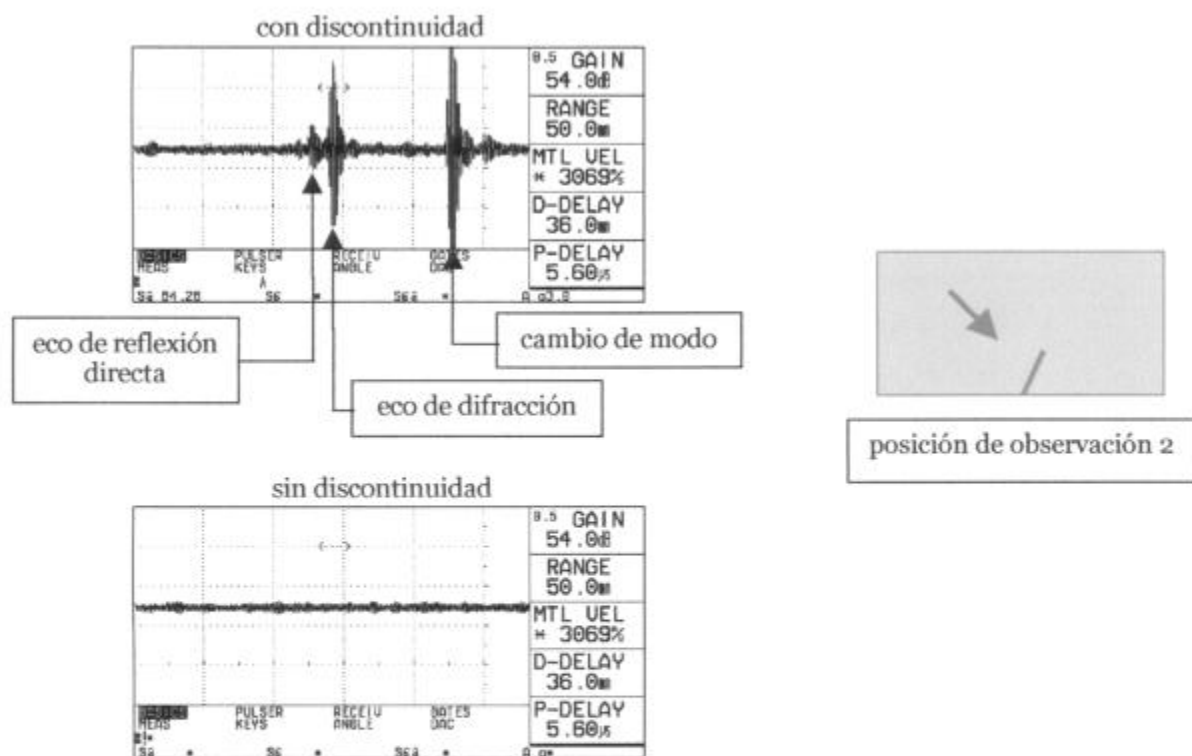


Fig. 5.8 Señal característica proveniente del lado opuesto de ranura, posición 2, técnicas A, B y D, transductores MWB-60 de 4 MHz, onda transversal.

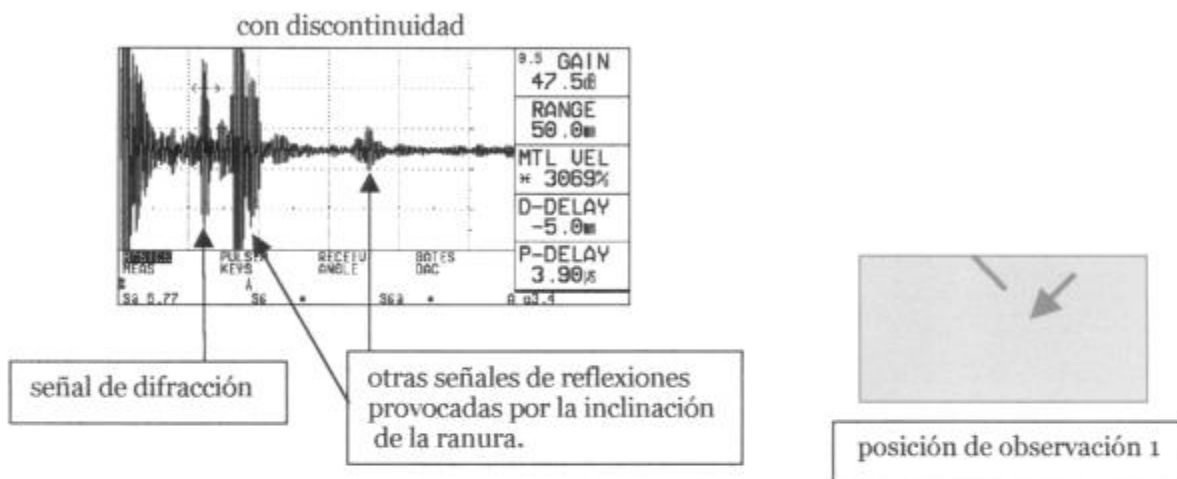


Fig. 5.9 Señal característica proveniente del lado de ranura, posición 1, técnica B, transductor MWB-45 de 4 MHz, onda transversal.

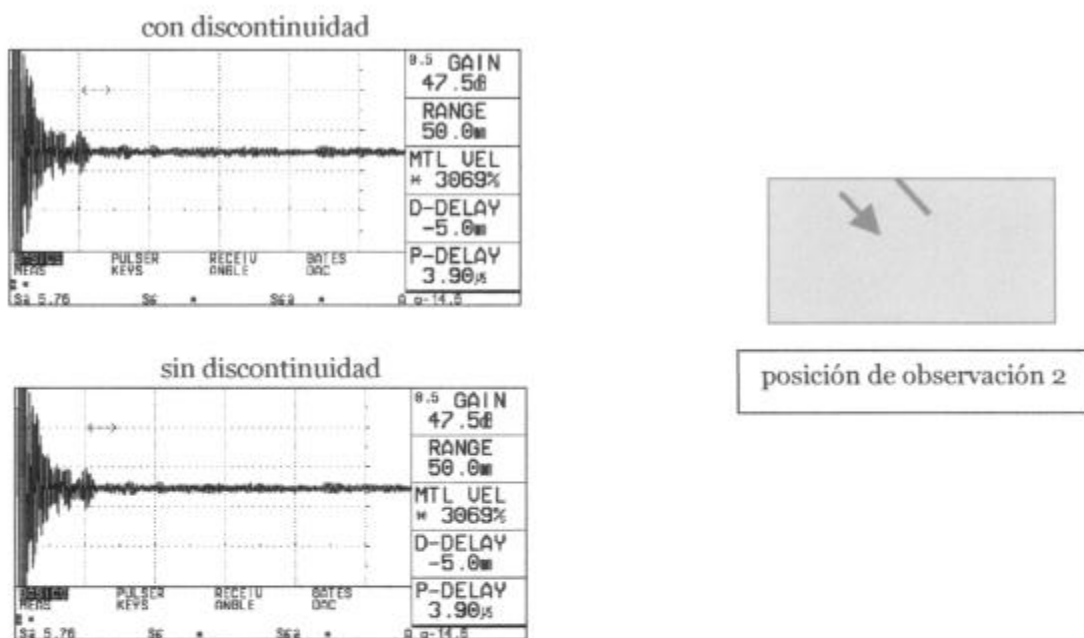


Fig. 5.10 Señal característica proveniente del lado de ranura, posición 2, técnica B, transductor MWB-60 de 4 MHz, onda transversal.

5.1.3 Mediciones realizadas con ondas longitudinales

Las mediciones llevadas a cabo con ondas del tipo longitudinal se emplearon única y exclusivamente sobre la probeta dos ya que el objetivo era el de estudiar el comportamiento de las ondas de difracción de ranuras orientadas a noventa grados, o sea, perpendicularmente respecto de la superficie que las contiene.

Tabla 5.7 Resultados obtenidos con la técnica A, lado opuesto a la ranura.

Resultados empleando el transductor WSY 60					
# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	6,83	0,48	3,82
	b	13,04	13,10	0,55	0,41
	c	20,01	19,42	0,42	2,90

Resultados empleando transductores piezocompuestos (65 °)					
# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	7,26	0,31	2,29
	b	13,04	12,54	0,39	3,90
	c	20,01	19,22	0,62	3,89

Resultados empleando el transductor WSY-70					
# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	7,24	1,37	2,02
	b	13,04	11,96	1,21	8,38
	c	20,01	19,83	0,54	0,87

Tabla 5.8 Resultados obtenidos con la técnica B, lado opuesto a la ranura.

Resultados empleando el transductor WSY 60					
# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	8,89	0,99	25,24
	b	13,04	14,46	0,47	10,82
	c	20,01	20,48	1,13	2,38

Resultados empleando transductores piezocompuestos (65 °)					
# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	6,16	4,48	13,18
	b	13,04	9,62	4,22	26,28
	c	20,01	21,06	2,42	5,28

Resultados empleando el transductor WSY-70					
# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	15,17	0,90	27,18
	b	13,04	13,51	2,57	3,49
	c	20,01	18,89	2,43	5,53

Tabla 5.9 Resultados obtenidos con la técnica B, lado de ranura.

Resultados empleando el transductor WSY 60					
# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	6,18	0,41	12,92
	b	13,04	12,30	0,91	5,76
	c	20,01	18,49	1,06	7,56
Resultados empleando transductores piezocompuestos (65 °)					
# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	7,49	0,46	5,51
	b	13,04	14,18	1,42	8,67
	c	20,01	20,65	1,65	3,27
Resultados empleando el transductor WSY-70					
# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	6,96	1,61	1,94
	b	13,04	12,39	1,07	5,07
	c	20,01	17,50	2,37	12,48

Tabla 5.10 Resultados obtenidos con la técnica C, lado opuesto a la ranura.

Resultados empleando el transductor WSY 60					
# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	-	-	-
	b	13,04	-	-	-
	c	20,01	-	-	-
Resultados empleando transductores piezocompuestos (65 °)					
# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	-	-	-
	b	13,04	-	-	-
	c	20,01	-	-	-
Resultados empleando el transductor WSY-70					
# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	6,46	0,05	8,95
	b	13,04	12,88	0,05	1,33
	c	20,01	18,73	0,05	6,37
- Dato no disponible					

Tabla 5.11 Resultados obtenidos con la técnica C, lado de ranura.

Resultados empleando el transductor WSY 60					
# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	-	-	-
	b	13,04	-	-	-
	c	20,01	-	-	-

Resultados empleando transductores piezocompuestos (65 °)

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	-	-	-
	b	13,04	-	-	-
	c	20,01	-	-	-

Resultados empleando el transductor WSY-70

# de probeta	ranura	dimensión real (mm)	dimensión calculada (mm)	Δc (mm)	error (%)
2	a	7,06	9,80	0,02	38,05
	b	13,04	15,46	0,02	18,50
	c	20,01	22,95	0,02	14,77

- Dato no disponible

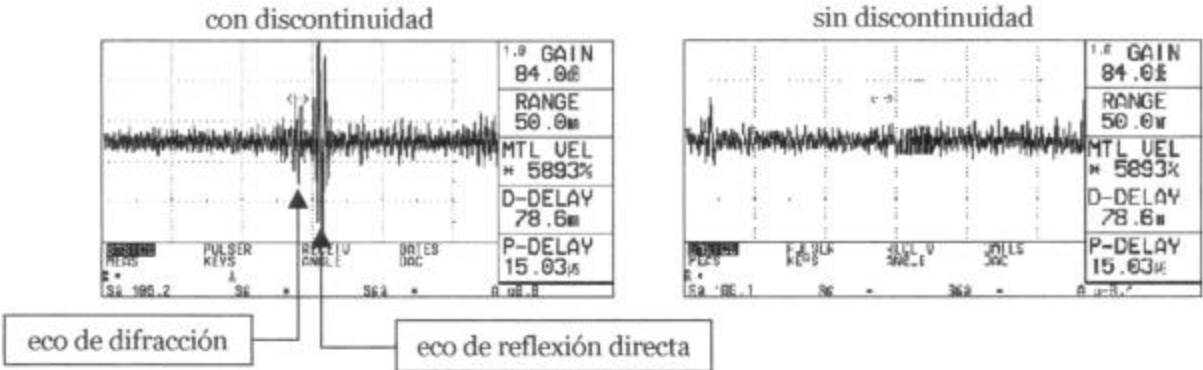


Fig. 5.13 Señal característica proveniente del lado opuesto de ranura, técnicas A y B, transductores WSY-60 de 4 MHz, onda longitudinal.

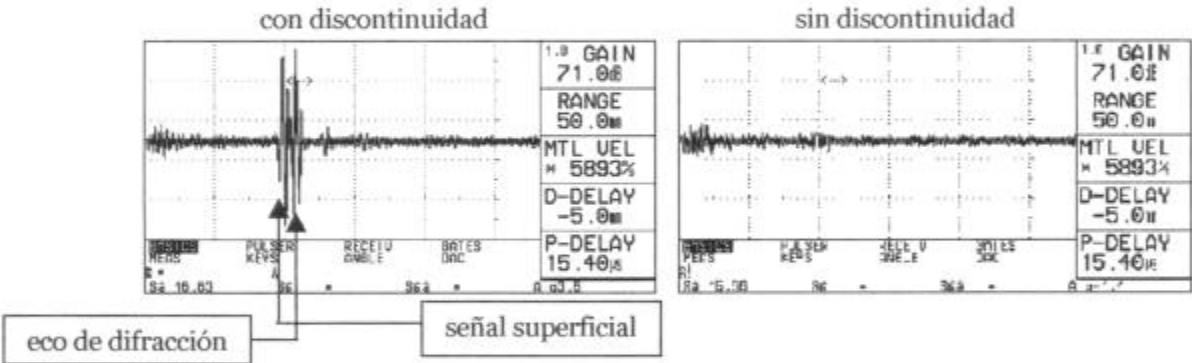


Fig. 5.14 Señal característica proveniente del lado de ranura, técnica B, transductor WSY-60 de 4 MHz, onda longitudinal.

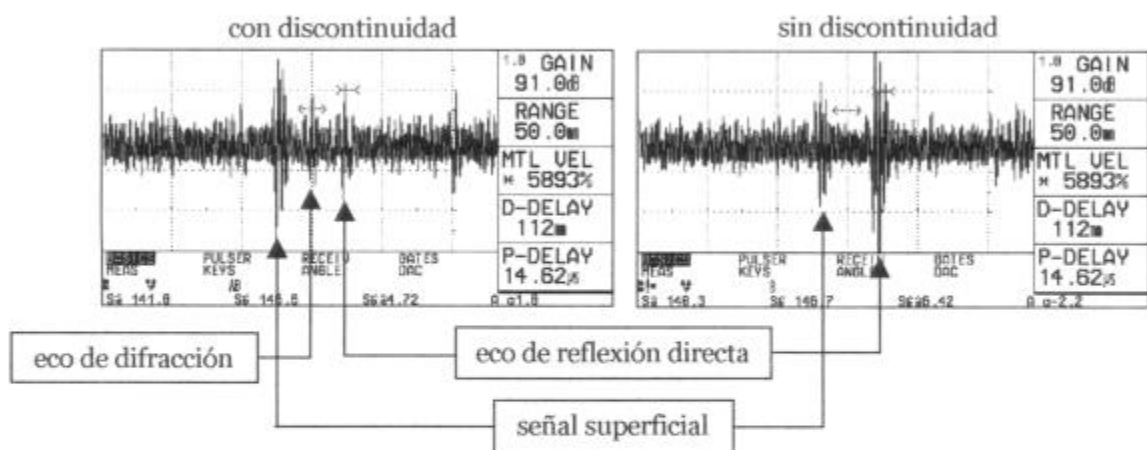


Fig. 5.15 Señal característica proveniente del lado opuesto de ranura, técnica C, transductores WSY-70 de 4 MHz, onda longitudinal.

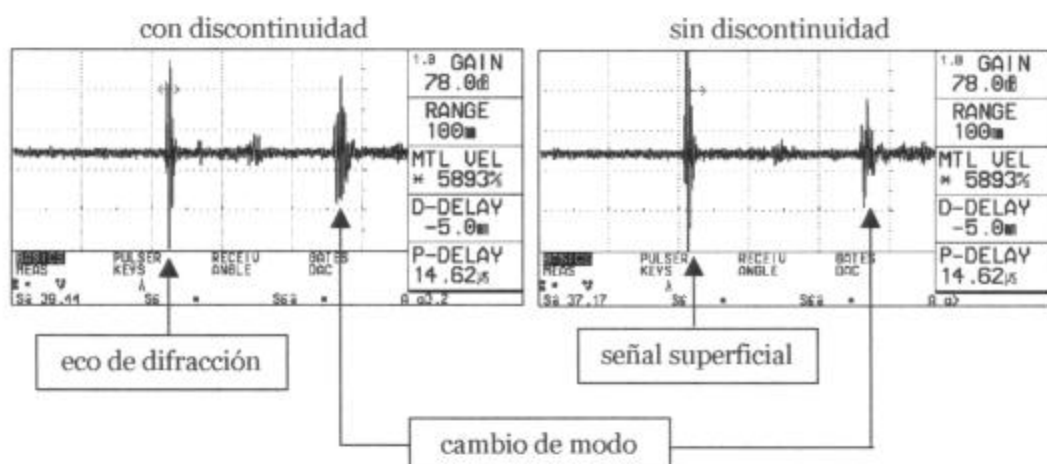


Fig. 5.16 Señal característica proveniente del lado de ranura, técnica C, transductores WSY-70 de 4 MHz, onda longitudinal.

5.2 Resultados cualitativos de los ensayos

5.2.1 Resultados para la probeta No.5

Para este caso, las señales que van a aparecer y que son de principal importancia son cuatro: una señal superficial, dos señales de difracción y una de reflexión directa. Como veremos a continuación, en los casos reales es muy difícil definir bien cada una de las señales que idealmente deberían aparecer. Lo anterior se debe a dos razones fundamentales: la primera se debe al tipo de transductores empleados ya que esto determina la cobertura del haz ultrasónico y la segunda es la geometría de la ranura y de la probeta. A continuación se muestran las señales características para este tipo de geometría.

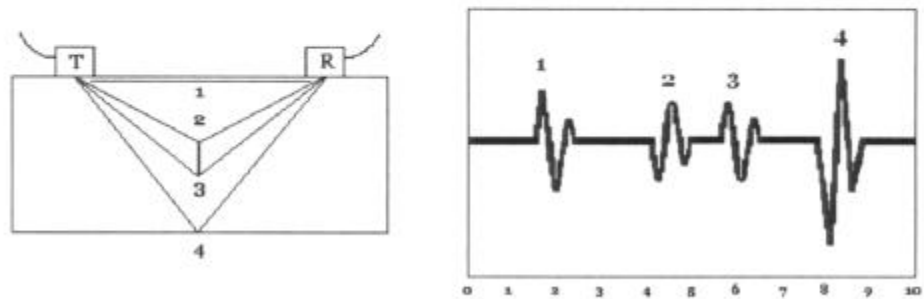


Fig. 5.17 Señales características obtenidas mediante una ranura centrada con la técnica C; se observa una señal superficial (1), dos ecos de difracción (2 y 3) y un eco de reflexión.

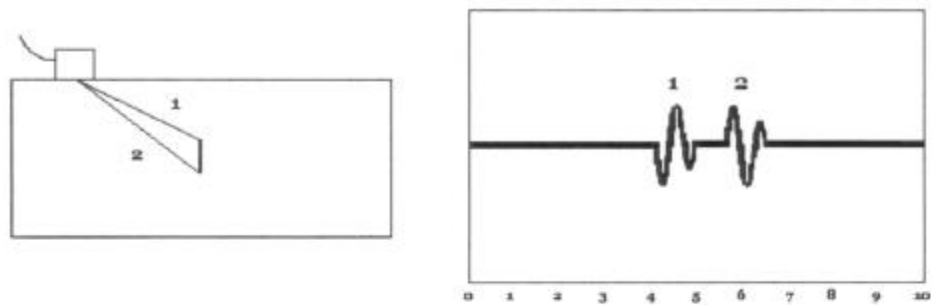


Fig. 5.18 Señales características obtenidas mediante una ranura centrada con la técnica B; se observan únicamente dos ecos de difracción.

Para esta probeta únicamente se han obtenido resultados cualitativos debido a las siguientes razones: apertura de la ranura es muy grande (1.15 mm) lo que produce ondas de difracción con una amplitud muy baja y además posee una longitud excesiva respecto de los ángulos de incidencia y tipo de transductores que se están utilizando. Las siguientes figuras muestran algunas señales observadas con este tipo de geometría.

A) Mediciones realizadas con ondas transversales

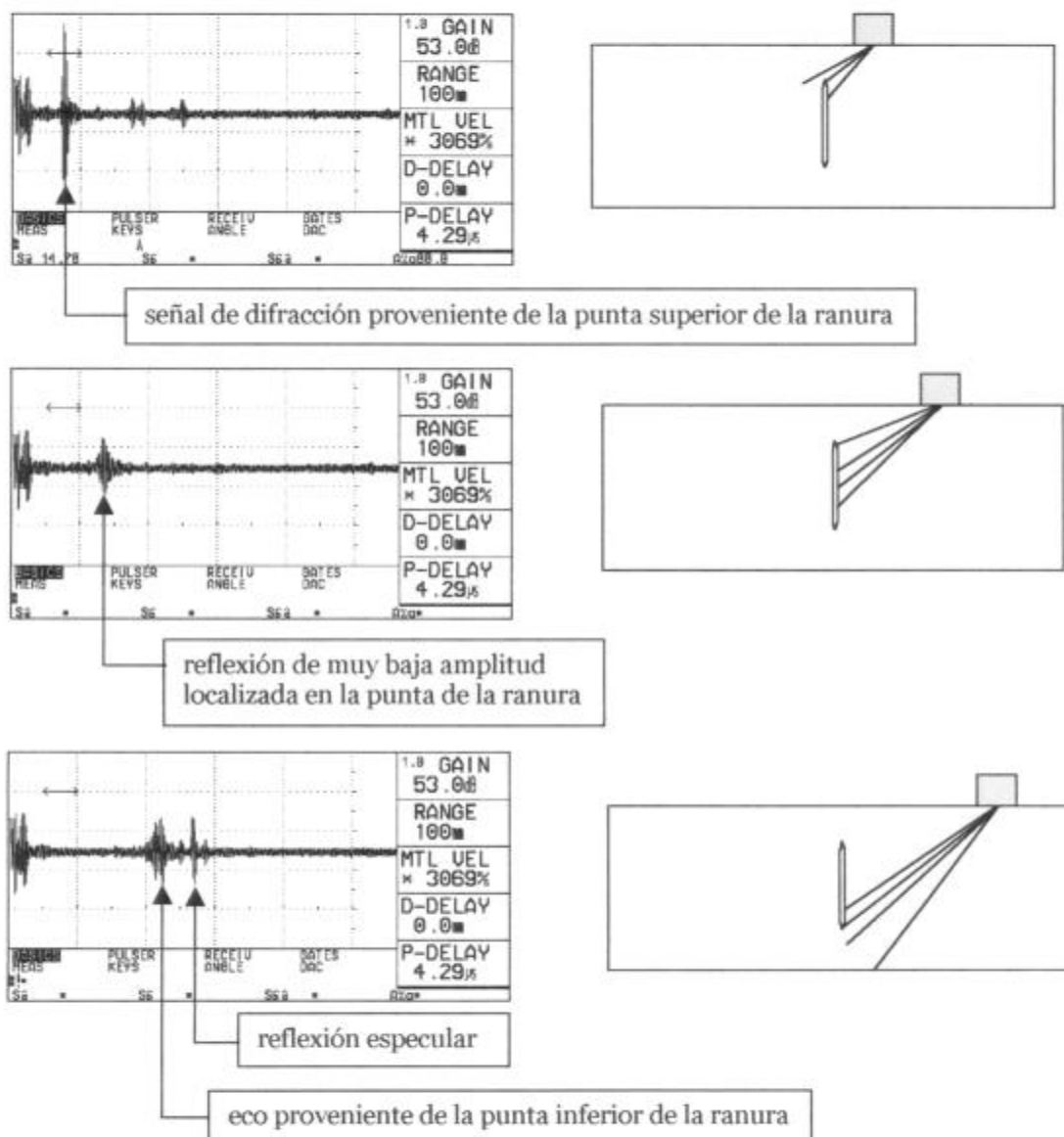
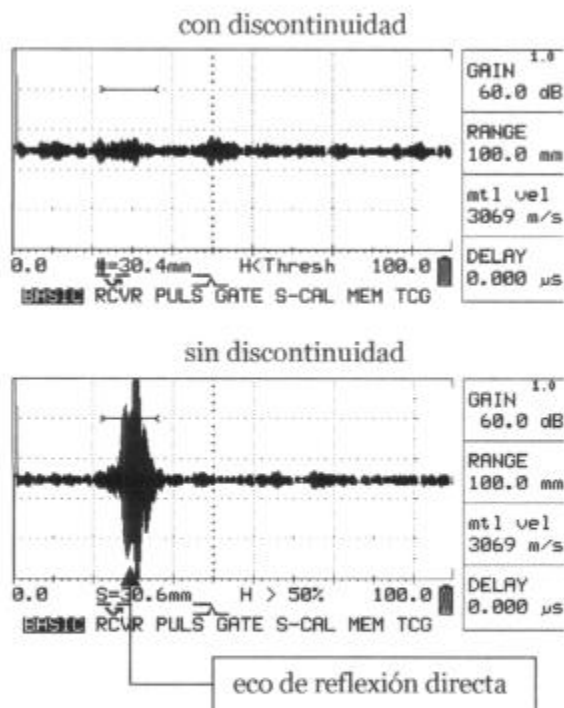


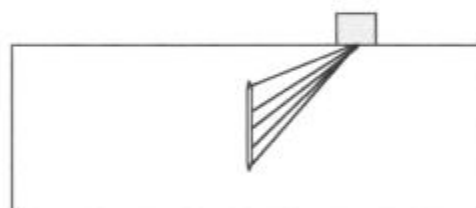
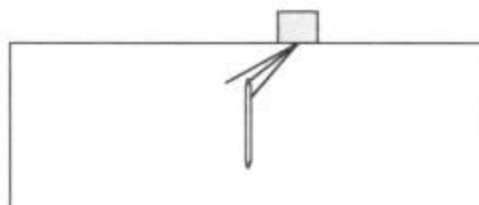
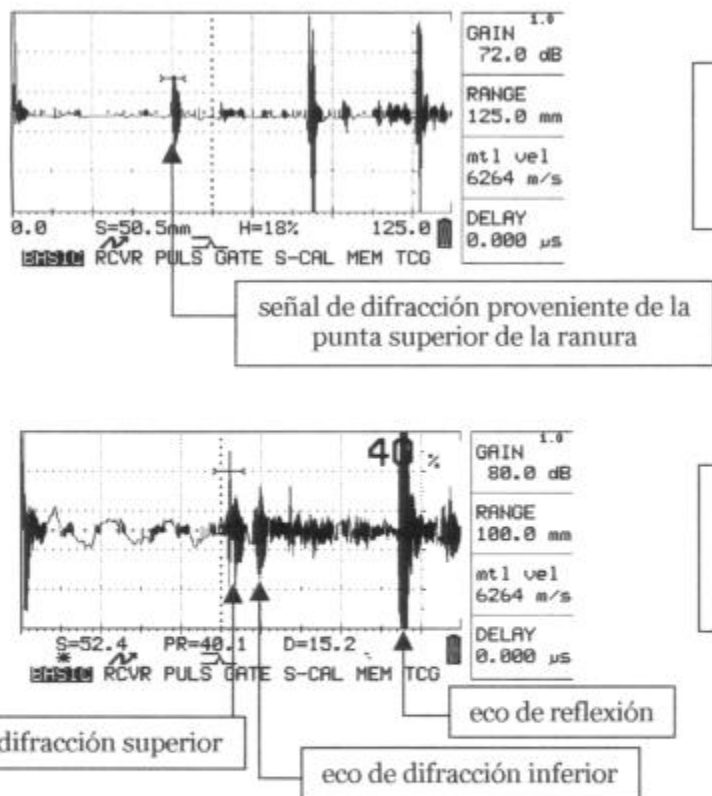
Fig. 5.19 Imágenes obtenidas con la ranura centrada para cada posición mostrada, técnica B, transductores MWB-60 de 4 MHz, onda transversal.



En este caso no se observa ninguna de las señales características de esta técnica como lo son la superficial y las de difracción. La razón de la no aparición es el tamaño de la ranura la cual es mucho mayor que la apertura del haz a esa distancia, debido a eso no se obtiene ninguna señal difractada. La de reflexión directa observada en la señal sin discontinuidad no se ve porque se han acercado los transductores para incidir en el centro de la ranura.

Fig. 5.20 Imágenes obtenidas con la ranura centrada para la técnica C, transductores MWB-60 de 4 MHz, onda transversal.

B) Mediciones realizadas con ondas longitudinales



continúa

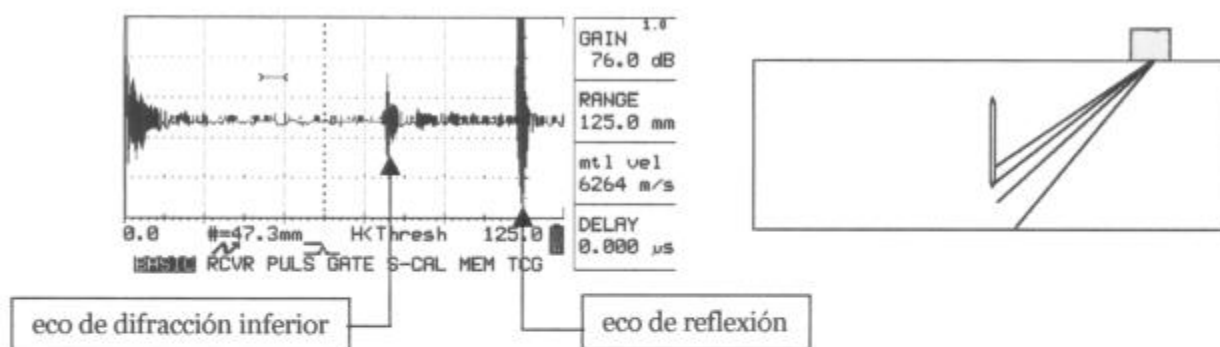


Fig. 5.21 Imágenes obtenidas con la ranura centrada para cada posición mostrada, técnica B, transductores piezocompuestos de 65° y 5 MHz.

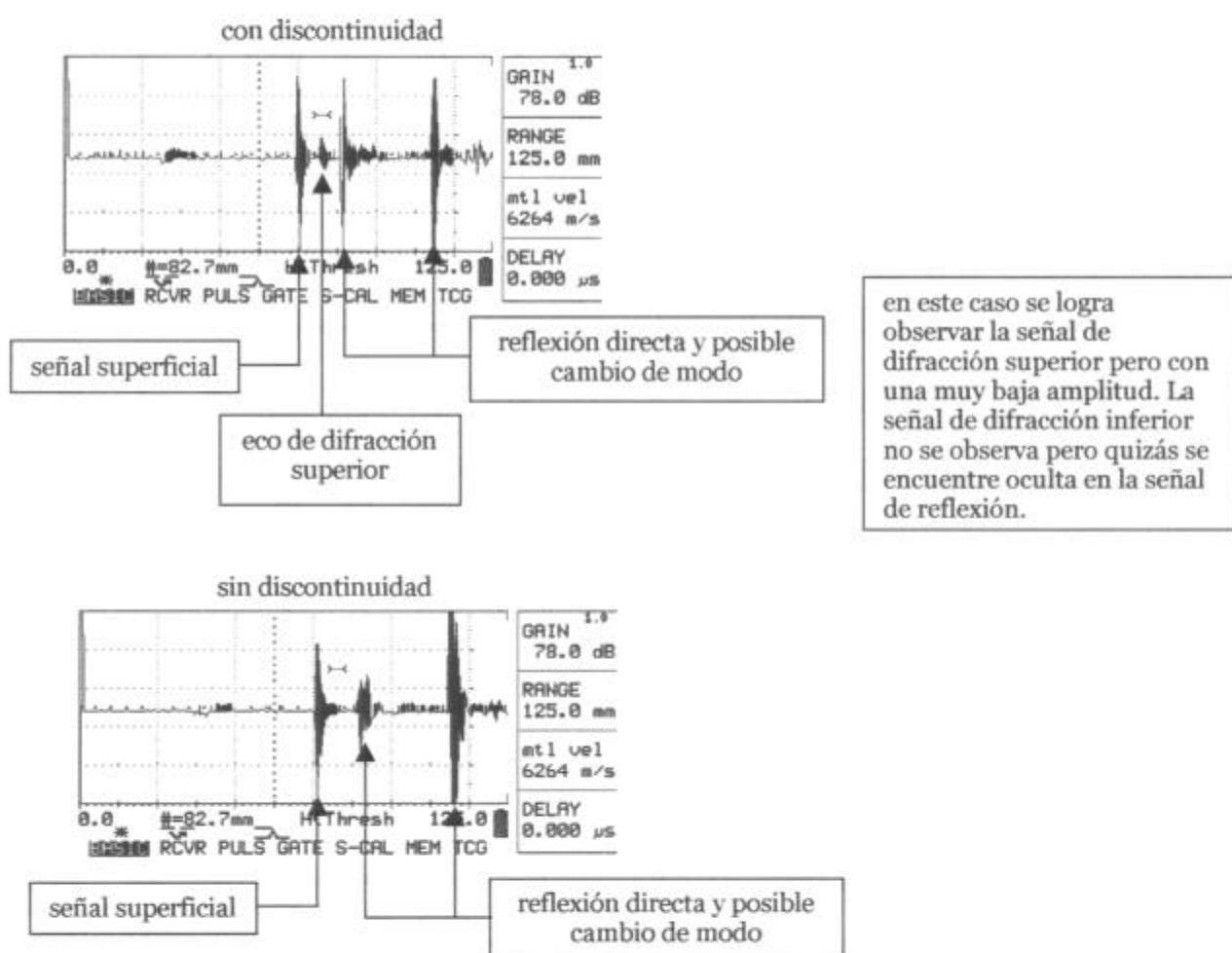


Fig. 5.22 Imágenes obtenidas con la ranura centrada para la técnica C, transductores piezocompuestos de 65° y 5 MHz.

5.2.2 Resultados para la probeta No. 6

El objetivo que se persigue al estudiar estos dos tipos de ranura es el de ver de qué manera se comporta la señal de difracción en cada uno de los casos. Ambas ranuras tratan de simular posibles laminaciones dentro de las piezas así como también posibles grietas causadas por hidrógeno. Lo importante en esta etapa es ver si es posible identificar el eco de difracción únicamente y utilizando el mismo equipo de ultrasonido, determinar su profundidad de acuerdo a los parámetros mostrados en la figura siguiente.

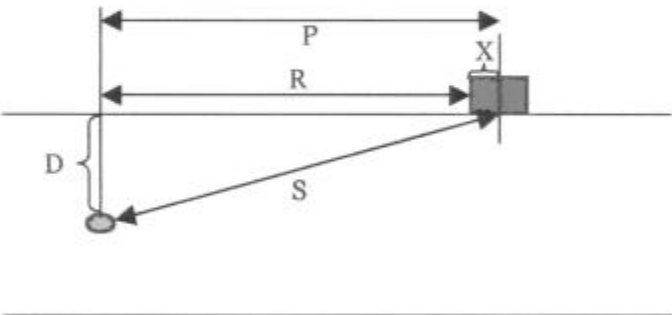


Fig. 5.23 Información que se puede obtener con el equipo USD 15S.

- P = distancia proyectada
- R = distancia proyectada reducida
- X = distancia frente-punto índice
- S = camino sónico efectivo
- D = distancia discontinuidad-superficie

A) Mediciones realizadas con ondas transversales (ranura horizontal)

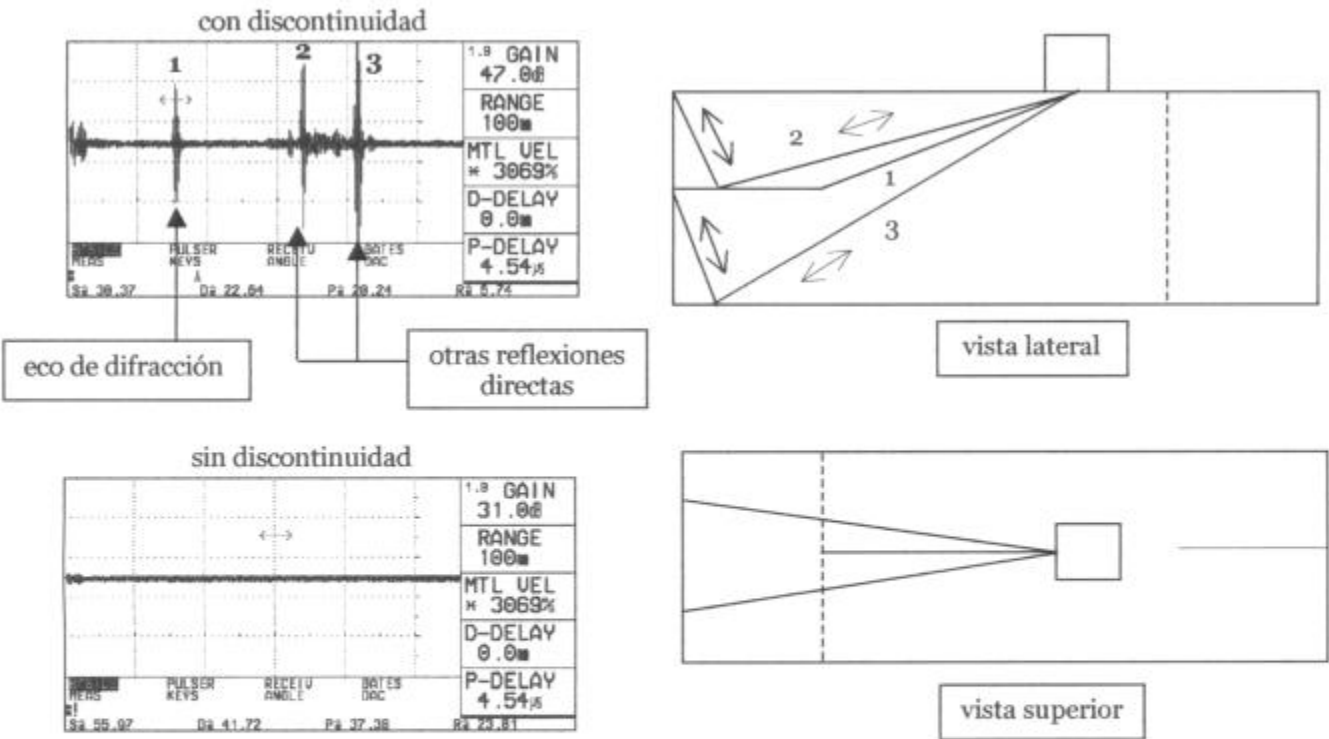


Fig. 5.24 Imágenes obtenidas con la ranura horizontal con la técnica B, transductores MBW-45 de 4 MHz, onda transversal.

B) Mediciones realizadas con ondas transversales (ranura vertical)

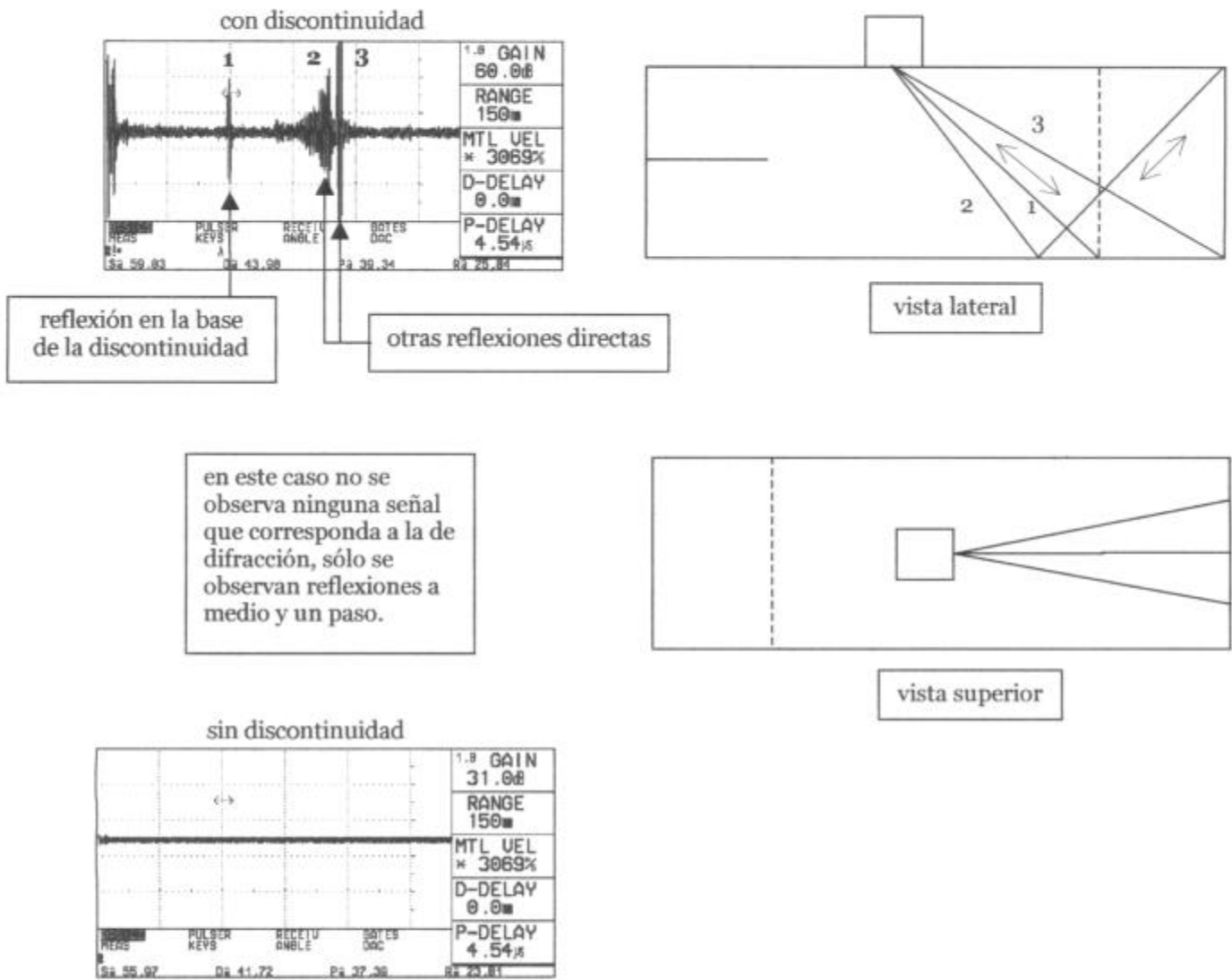


Fig. 5.25 Imágenes obtenidas con la ranura vertical para la técnica B, transductores MBW-45 de 4 MHz, onda transversal.

C) Mediciones realizadas con ondas longitudinales (ranura horizontal)

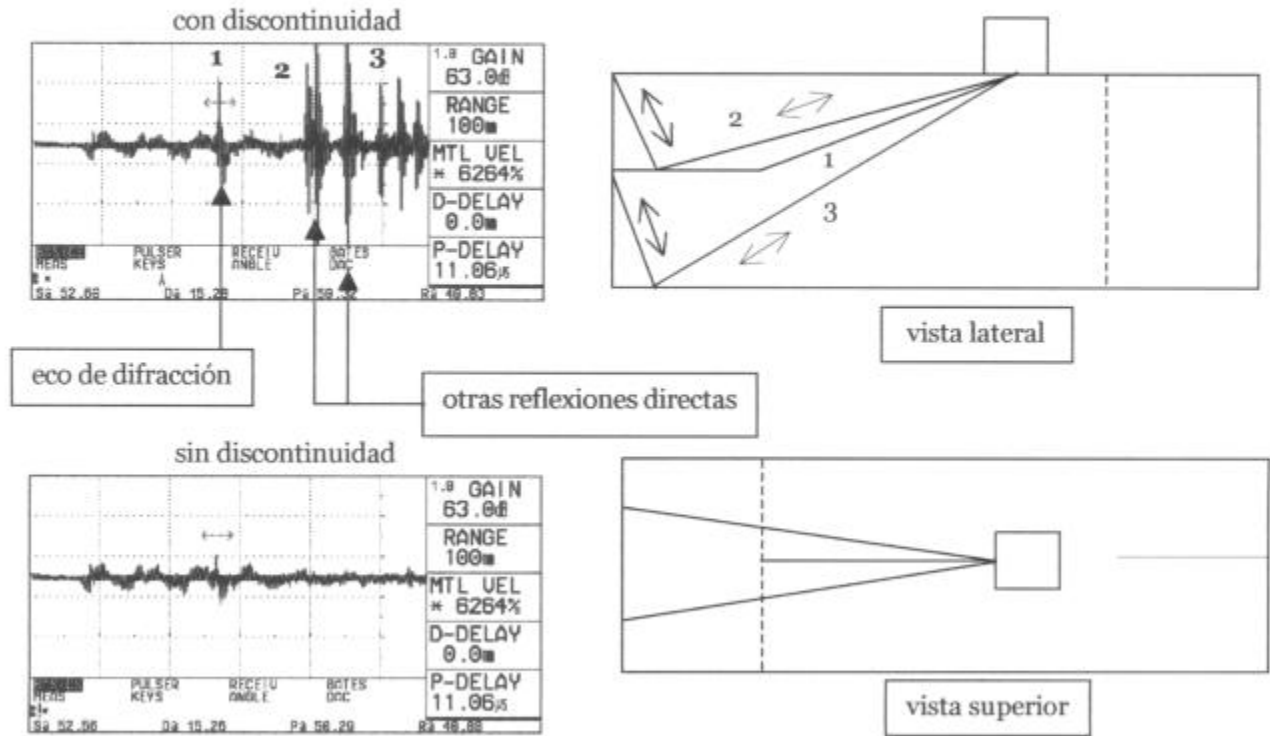


Fig. 5.26 Imágenes obtenidas con la ranura horizontal para la técnica B, transductores piezocompuestos de 65° y 5 MHz, onda longitudinal.

D) Mediciones realizadas con ondas longitudinales (ranura vertical)

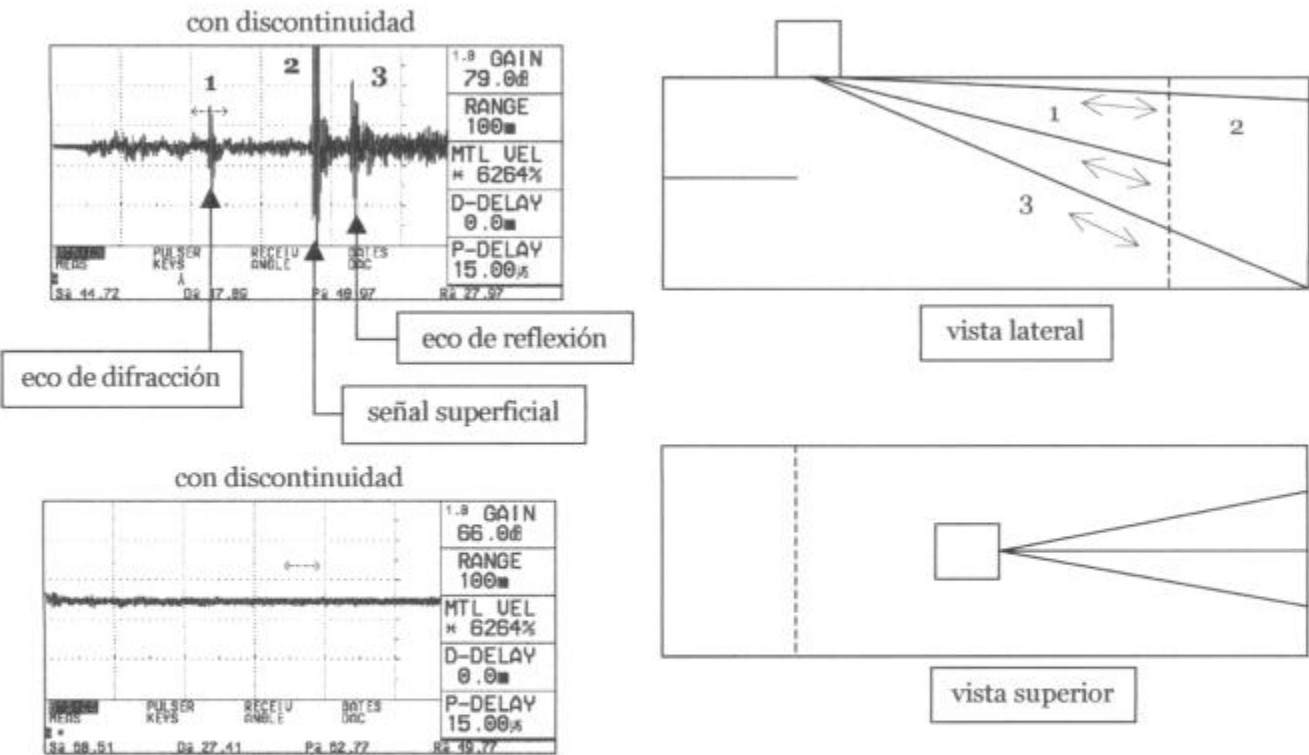


Fig. 5.27 Imágenes obtenidas con la ranura vertical para la Técnica B, transductores piezocompuestos de 65° y 4 MHz, onda longitudinal.

5.2.3 Resultados de las probetas 7 y 8 (ensayo de flexión)

Este ensayo se llevó a cabo empleando el esquema mostrado a continuación. Para cada una de las probetas se ha hecho un cálculo aproximado para obtener una apertura mínima a partir de la cual se puede observar la señal de difracción claramente distinguible entre las señales de ruido (pasto).

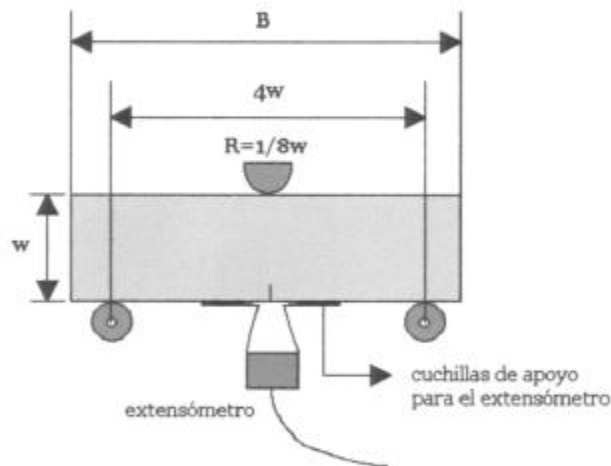


Fig. 5.28 Esquema general del ensayo de flexión en tres puntos; se observa también la posición del extensómetro así como los apoyos donde va montada la probeta.

A) Observaciones del ensayo (probeta 7)

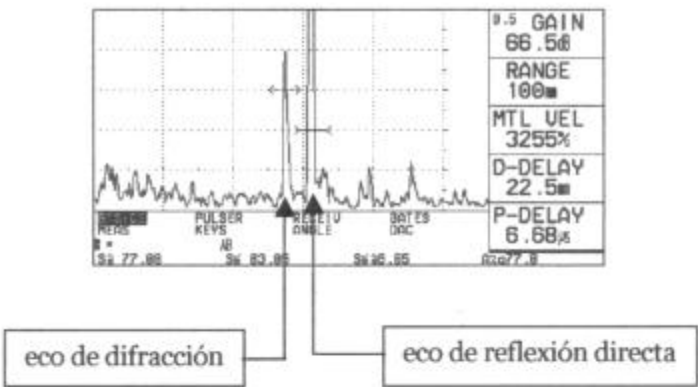


Fig. 2.29 Señal de la probeta No. 2 la cual ha sido utilizada como patrón, transductor MWB-60 onda transversal; se observa que la señal de difracción llega al 80 % ATP.

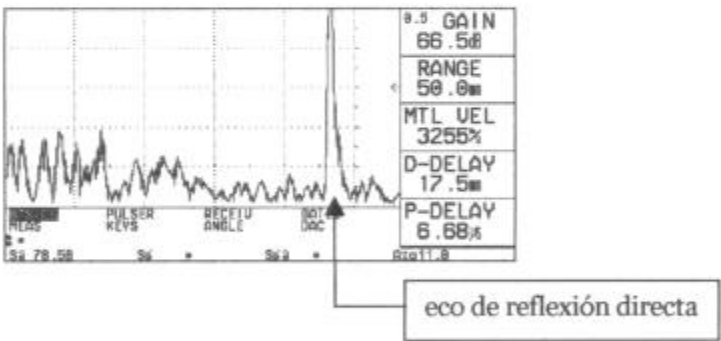


Fig. 2.30 Señal obtenida de la probeta No.7 antes del ensayo, transductor MWB-60 onda transversal, únicamente se observa el eco de reflexión directa en la fisura. No se aprecia ninguna otra señal característica que pueda identificar la de difracción.

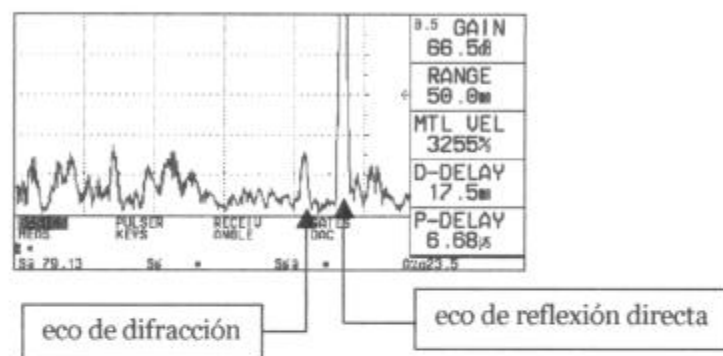


Fig. 2.31 Imagen obtenida a partir de una carga de 4470 Kg, en ese momento momento empieza a aumentar la amplitud de la señal de difracción.

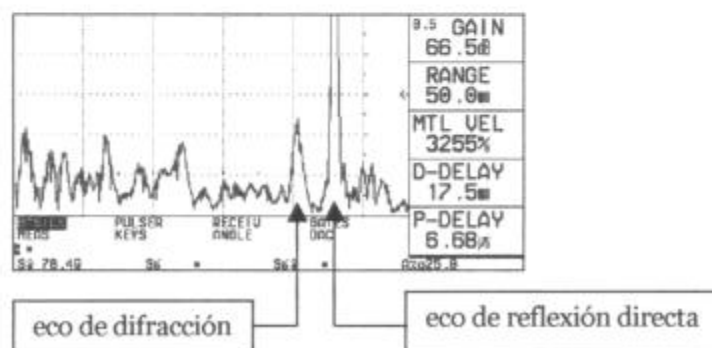


Fig. 2.32 Imagen obtenida para una carga de 6178 Kg, sigue aumentando la amplitud de la señal difractada.

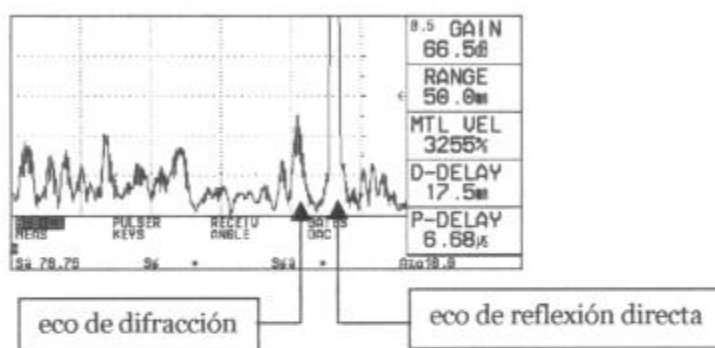


Fig. 2.33 Para el nivel de carga de 7951 Kg no se observan variaciones en la amplitud de la señal difractada por lo que se decide detener el ensayo en ese punto.

a) Cálculos de la apertura de la fisura

$a = a_0 = 15.80 \text{ mm}$
 $w = 42.20 \text{ mm}$
 $\sigma_{YS} = 200 \text{ N/mm}^2$
 $E = 206010 \text{ N/mm}^2$
 $\nu = 0.3$
 $B = 249.90 \text{ mm}$
 $P = 43850.70 \text{ N}$
 $F(a/W) = 7.40$
 $K = 199.71 \text{ N/mm}^{3/2}$
 $\delta_e = 0.00044 \text{ mm}$
 $V_e = 0.02 \text{ mm}$
 $V_g = 0.09 \text{ mm}$
 $V_p = 0.07 \text{ mm}$
 $\delta_p = 0.03 \text{ mm}$
 $\delta = \mathbf{0.03 \text{ mm}}$

B) Observaciones del ensayo (probeta 8)

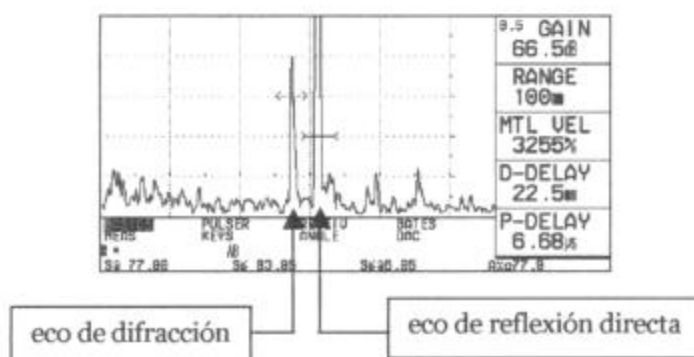


Fig. 2.34 Señal de la probeta No. 2 la cual ha sido utilizada como patrón, transductor MWB-60 onda transversal; se observa que la señal de difracción llega al 80 % ATP.

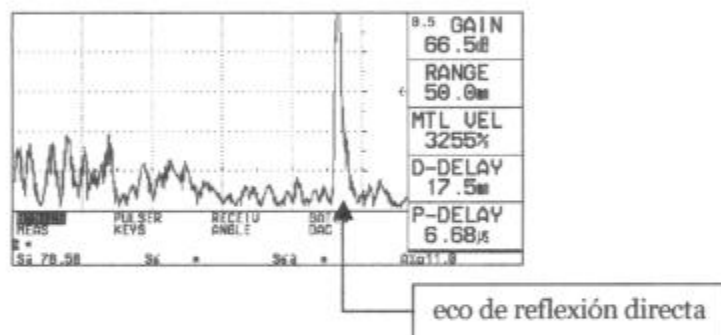


Fig. 2.35 Señal obtenida de la probeta No.8 antes del ensayo, transductor MWB-60 onda transversal, únicamente se observa el eco de reflexión directa en la fisura. No se aprecia ninguna otra señal característica que pueda identificar la de difracción

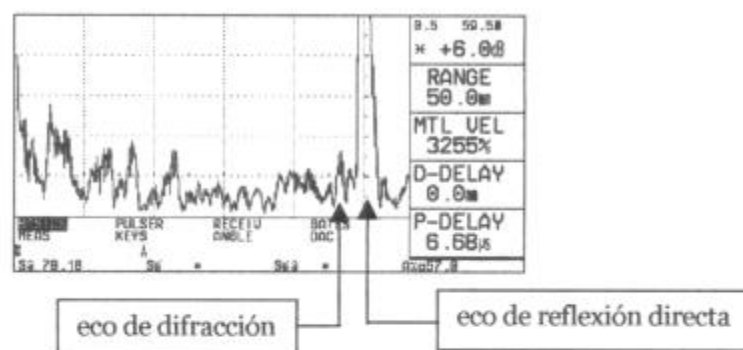


Fig. 2.36 Aparición de un eco de difracción de muy baja amplitud correspondiente a una carga de 1500 Kg.

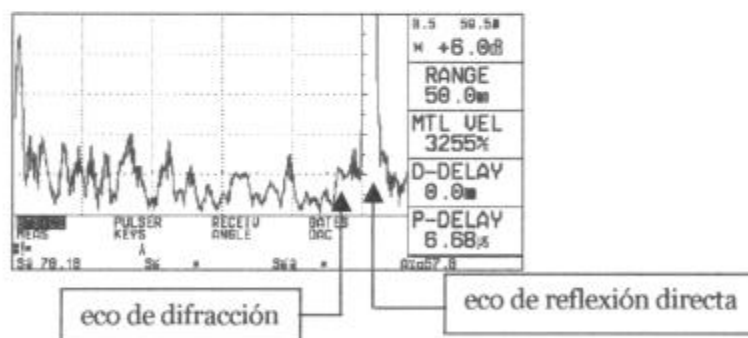


Fig. 2.37 Aumento de la amplitud de la señal para una carga de 5000 Kg. Al crecer la apertura de la fisura la señal de ultrasonido tiende a fluctuar y confundirse con el eco de reflexión directa.

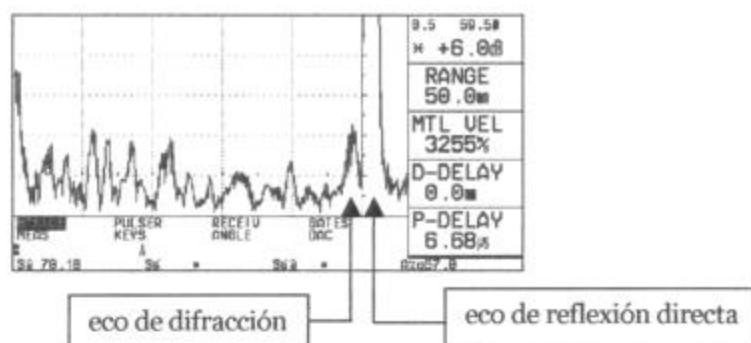
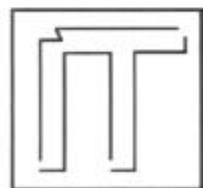


Fig. 2.38 Esta señal corresponde a una carga de 6289 Kg, la amplitud de la señal difractada se mantiene constante.

a) Cálculos de la apertura de la fisura

$a = a_0 = 8.25 \text{ mm}$
 $w = 29.85 \text{ mm}$
 $\sigma_{YS} = 200 \text{ N/mm}^2$
 $E = 206010 \text{ N/mm}^2$
 $\nu = 0.3$
 $B = 229.90 \text{ mm}$
 $P = 14715.00 \text{ N}$
 $F(a/W) = 5.73$
 $K = 67.15 \text{ N/mm}^{3/2}$
 $\delta_e = 0.00005 \text{ mm}$
 $V_e = 0.003 \text{ mm}$
 $V_g = 0.02 \text{ mm}$
 $V_p = 0.02 \text{ mm}$
 $\delta_p = 0.01 \text{ mm}$
 $\delta = 0.01 \text{ mm}$

Análisis de Resultados



Parte VI: “Análisis de Resultados”

En esta parte del trabajo se presenta en forma resumida, los aspectos de mayor relevancia durante la realización de los ensayos correspondientes. El objetivo es dar a conocer información de suma importancia que se debe tener en cuenta en caso de que se necesite repetir los ensayos o se quieran verificar los resultados obtenidos. Pero lo más interesante de esta sección es que permite ver el por qué de los resultados así como la forma en que fueron obtenidos.

6.1 Dimensionamiento de discontinuidades

6.1.1 Probeta No. 1

Esta probeta sirvió para la realización de mediciones preliminares a manera de práctica y con ella se pusieron a punto no sólo el equipo sino también las diferentes técnicas a emplear.

En un primer momento se determinó el grado de atenuación del material, dando como resultado 0,01 dB/mm siendo esta la recomendada para no tener grandes pérdidas de energía ultrasónica y poder apreciar bien las señales difractadas.

En la etapa de mediciones, se tomaron datos cada milímetro a partir de la posición de máxima amplitud y hacia cada lado de la ranura, cuyo máximo de la señal se llevó al 80% de la altura total de la pantalla y el mínimo al 10%. El anterior fue un criterio arbitrario que se utilizó con el objetivo de obtener suficientes datos para estudiar las señales antes mencionadas. Debido a esto, fue necesario realizar muchas mediciones lo que implica mucho tiempo en cada barrido, aunque si bien es cierto que al tener una mayor cantidad de datos el promedio final puede ser un poco más exacto que si se obtuvieran unas pocas mediciones. Se debe destacar que las señales provenientes de las tres ranuras de diferente profundidad (**a**= pequeña, **b**= mediana, **c**= grande) se observan con bastante claridad en cada uno de los métodos empleados, como se aprecia en la figura 6.1.



Fig. 6.1 Señal característica proveniente del lado opuesto de la ranura, técnicas A y B, transductores MWB-45 de 4 MHz, onda transversal.

Para la técnica A y B empleando ondas transversales se observan bien diferenciadas las señales de eco de difracción y el eco de reflexión directa de la ranura por lo que no existe ninguna dificultad para el dimensionado. Los datos faltantes en las tablas de resultados es causa de la geometría propia de la probeta, en donde para algunas de las mediciones el transductor simplemente quedaría fuera de la probeta. Las únicas dos diferencias observadas conforme varía la profundidad de la ranura o la técnica empleada es que la señal difractada se corre hacia distancias menores o bien, el eco de reflexión directa desaparece generalmente cuando se realiza el análisis del lado de la ranura, pero aún así las señales son lo suficientemente claras para poderlas analizar (fig.6.2).

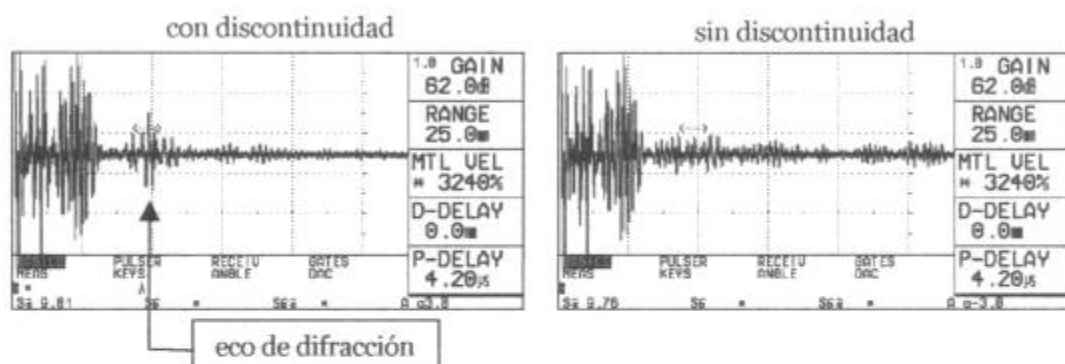


Fig. 6.2 Señal característica proveniente del lado de la ranura, técnica B, transductores MWB-45 de 4 MHz, onda transversal.

Respecto de la técnica C, únicamente se pudo emplear sobre la ranura **a** con los angulares de 45° debido a la geometría de dicha pieza. Desde el lado opuesto, la única dificultad que se puede tener es la pérdida de resolución (depende de los transductores empleados) entre el eco difractado y el eco de reflexión directa principalmente para ranuras de poco tamaño (menores a los 10 mm de profundidad), pero una vez diferenciados se puede realizar un dimensionado bastante confiable (fig. 6.3).

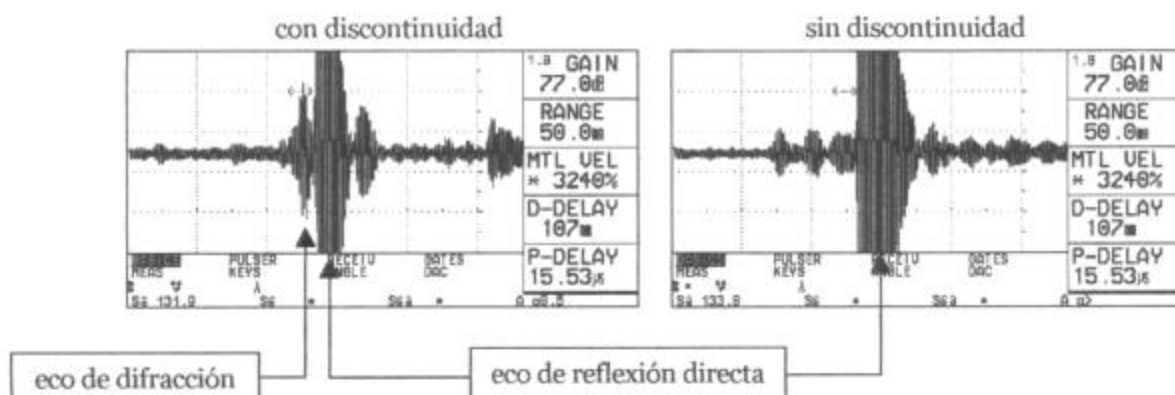


Fig. 6.3 Señal característica proveniente del lado opuesto de la ranura, técnica C, transductores MWB-70 de 4 MHz, onda transversal.

Del lado de la ranura el problema es que cuando la discontinuidad es pequeña (10 mm o menos), los palpadores quedan muy juntos uno del otro por lo que las señales recibidas son confusas e incluso se pierde el eco difractado (fig. 6.4). Además, cuando se estudian discontinuidades abiertas a la superficie y de poca profundidad, se debe acercarse tanto el transductor a dicha discontinuidad, corriéndose el riesgo de obtener mediciones con el campo cercano del palpador lo que no es recomendable.

El estudio de esta probeta con ondas longitudinales no se llevó a cabo ya que los palpadores disponibles tenían ángulos de incidencia que, de acuerdo a la geometría de la pieza, fue imposible emplearlos. De todas formas, un análisis más exhaustivo con estas ondas se llevará a cabo en la probeta No.2 la cual permitirá hacer barridos con todos los palpadores y desde todas las posiciones posibles.

El tratamiento de errores llevado a cabo en las mediciones hechas con ondas transversales sobre esta probeta indica que para la técnica A (gráfico 6.1), los errores cometidos son bastante bajos, esto tomando como límite aceptable un 5%, salvo una pequeña fluctuación observada al emplear el transductor de 60° .

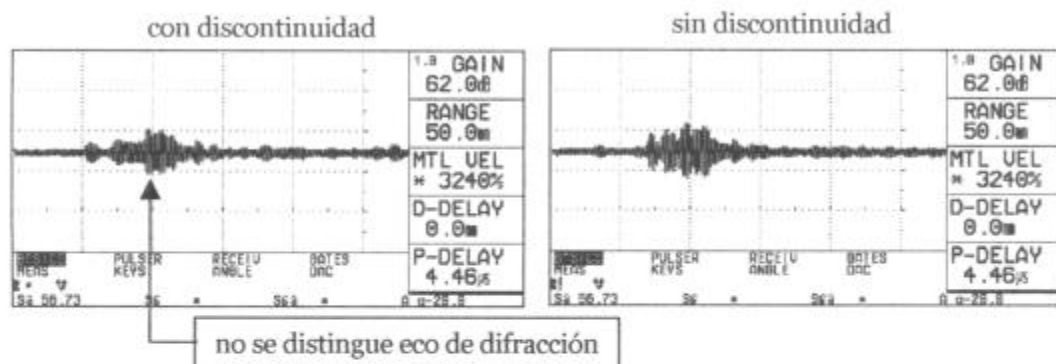
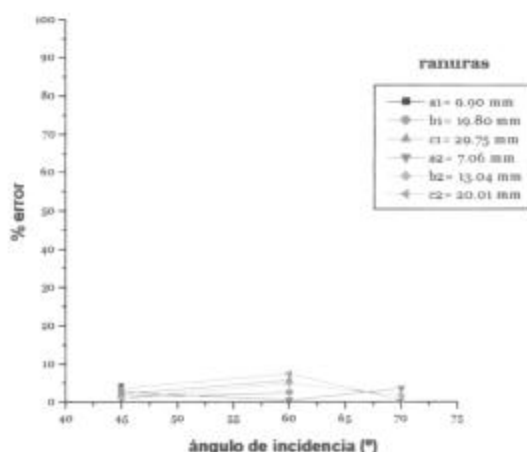


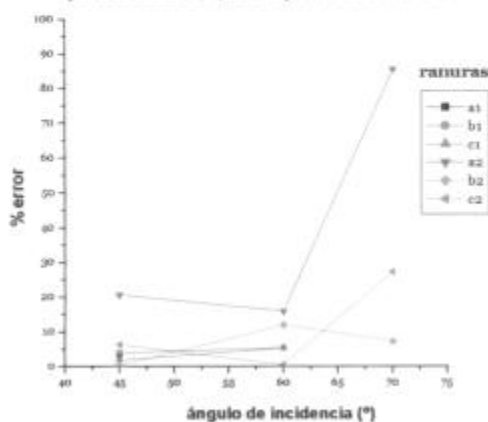
Fig. 6.4 Señal característica proveniente del lado de la ranura, técnica C, transductores MWB-45 de 4 MHz, onda transversal.

Gráfico 6.1. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica A, lado opuesto de ranura.



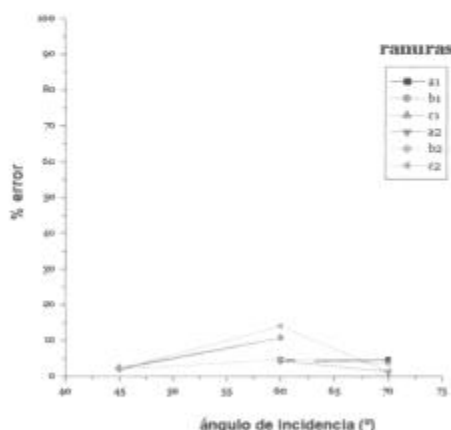
Para la técnica B empleada desde el lado opuesto de la ranura (gráfico 6.2) se observa un aumento de los errores respecto de la técnica A y esto se debe a que la precisión con que se mida la diferencia de distancias entre las dos posiciones donde se toman los datos, influye mucho sobre el resultado final aún cuando dichas fluctuaciones sean mínimas. Además, para el transductor de 70° se obtienen errores más altos especialmente para las ranuras de poco tamaño (menores que 10 mm).

Gráfico 6.2. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica B, lado opuesto de ranura.



Para esta misma técnica pero del lado de la ranura (gráfico 6.3) los errores vuelven a ser aceptables y estos fluctúan en el caso del palpador de 60 grados nuevamente. Por último, como para el tratamiento de errores de la técnica C no se obtuvieron los datos suficientes, se ha dejado su análisis para la siguiente probeta, aunque en un principio se ha observado que la principal ventaja es que ofrece la facilidad de obtener mediciones muy precisas en un solo paso.

Gráfico 6.3. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica B, lado de ranura.



6.1.2 Probeta No. 2

Una vez que se pusieron a punto las técnicas empleando para esto la probeta No.1, se decidió reducir la cantidad de mediciones a sólo 6. En realidad se observó que el dato más preciso correspondía al punto donde se obtenía la máxima amplitud de la señal difractada, lo que durante la inspección tiene una contribución positiva en lo que se refiere al tiempo de ensayo. Pero teniendo en cuenta que en la técnica B es necesario tomar los datos desde posiciones diferentes, se decidió que todas las mediciones serían realizadas en tres puntos a partir del máximo y hacia cada lado de la ranura. Estos puntos corresponden a la caída de los 6, 12 y 20 dB a partir del máximo de la señal difractada; dicho máximo puede ser el 80% de la ATP.

Los resultados obtenidos para las ondas transversales son similares a los de la probeta No.1 lo que ha servido para reafirmar todo lo dicho anteriormente para las técnicas A y B. Para la técnica C se debe agregar que para los barridos realizados del lado de la ranura, especialmente para la más pequeña, la colocación de los palpadores imposibilita la observación de ecos de difracción porque la mínima distancia que se debe dejar entre ellos la ocupan sus propios cabezales. Además, al estar los transductores tan cerca de la discontinuidad es probable que se esté midiendo con el campo cercano del mismo lo que provoca una amplitud de señal muy variable y muy confusa como para tomarla en cuenta en la determinación de su dimensión.

Debido a que con ondas longitudinales se han observado dificultades para la interpretación de las señales como se verá a continuación, es que ellas se han empleado únicamente en esta probeta. Se puede decir al respecto que las señales difractadas y de reflexión se comportan similarmente para cada tipo de ranura y para cada método empleado. El único inconveniente que se tiene al emplear este tipo de palpadores es la dificultad para distinguir dichas señales ya que por un lado se tiene un aumento del ruido por el aumento de la ganancia y porque existe una mayor cantidad de cambios de modo y reflexiones que pueden interferir y pueden confundir los ecos de importancia. Observando las discontinuidades del lado opuesto, se distinguen bien los ecos de difracción y el de fondo tanto para la técnica A como para la B (fig. 6.5).

En los casos estudiados del lado de ranura, es muy común la aparición de una señal que se transmite muy cerca de la superficie y la cual aumenta de amplitud conforme se acerca a una superficie reflectora que se ubique a cualquier distancia a partir del frente del palpador. Muchas veces esta señal se ubica sobre o muy cerca del eco de difracción lo que causa problemas a la hora de identificar los ecos para el dimensionado correspondiente. Lo anterior se muestra en la figura 6.6.

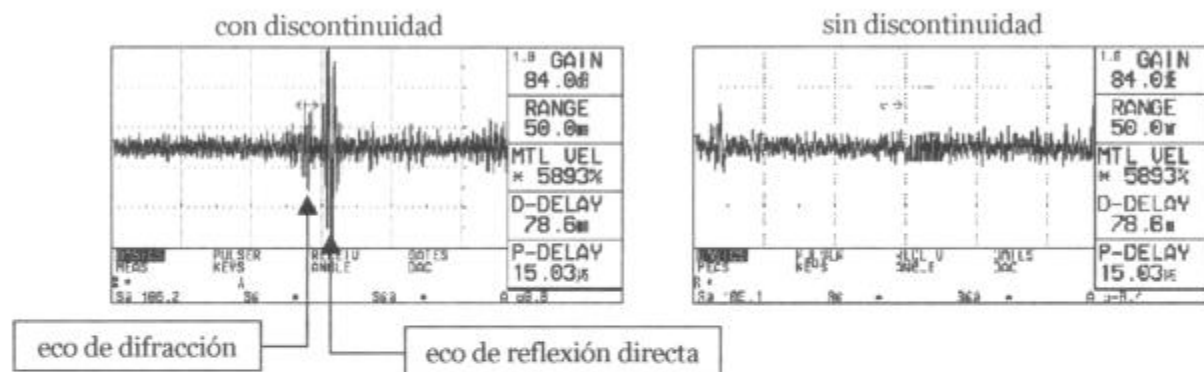


Fig. 6.5 Señal característica proveniente del lado opuesto de ranura, técnicas A y B, transductores WSY-60 de 4 MHz, onda longitudinal.

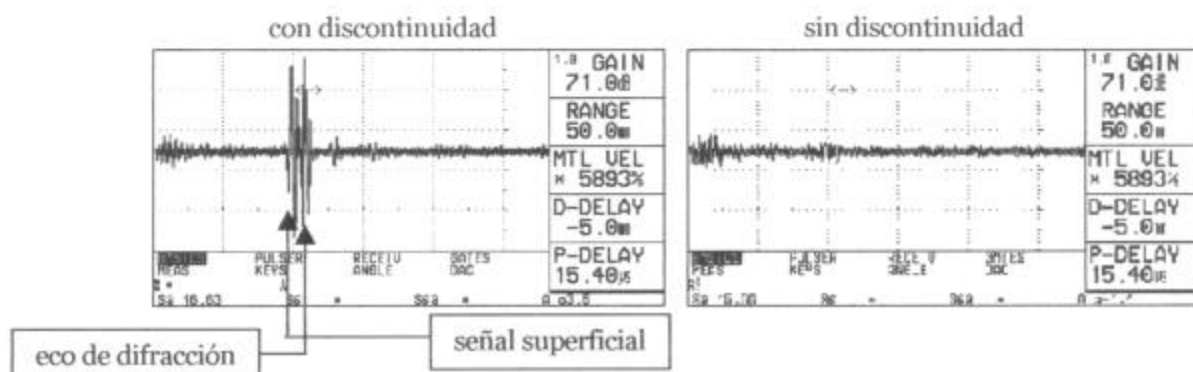


Fig. 6.6 Señal característica proveniente del lado de ranura, técnica B, transductor WSY-60 de 4 MHz, onda longitudinal.

Para la técnica C, del lado opuesto de la ranura (fig. 6.7) también aparece la señal de superficie tanto para la señal de calibración (sin defecto) como para la que proviene de la discontinuidad. Esta señal siempre aparecerá a menos que tenga interrumpido su camino, como se verá del lado de la ranura (fig. 6.8). Como se observa en las figuras antes citadas, el eco de difracción aparece casi sobre la misma posición en la que estaba el eco de la señal superficial por lo que en un primer momento se dificulta mucho su ubicación y luego su dimensionamiento. Es muy difícil también conseguir la calibración correcta con esta técnica debido a los cambios de modo y otras reflexiones que aparecen. Es necesario destacar que también se llevaron a cabo mediciones con los transductores piezocompuestos y con la técnica C. En este caso se observaron problemas como inestabilidad en el acoplamiento entre las zapatas y la superficie metálica, dificultad para su sujeción y manipulación además de los ya citados como la aparición de ecos no deseados, cambios de modo y reflexiones que interrumpen las señales difractadas.

El análisis desde el punto de vista de la precisión para el caso de ondas transversales es el mismo que el realizado con la probeta No.1 ya que las ranuras estaban orientadas de la misma forma y lo único que va variando es su tamaño y dicha variación es muy pequeña. Para el caso de ondas longitudinales y la técnica A, del gráfico 6.4 se observa que el error es aceptable para los tres tipos de transductores empleados. Si bien es cierto que en la teoría se menciona que este tipo de ondas es el más apropiado en comparación con las ondas transversales, esta es una idea muy relativa ya que depende de los palpadores que se han empleado. En nuestro caso sucede que el error no sólo para la técnica A sino para las demás en donde se emplean ambos tipos de ondas, son muy similares en todos los casos pero la dificultad para lograr observar la señal y aún más, para dimensionar la discontinuidad correspondiente es tan grande que realmente hace ver el ensayo por ondas transversales como el más apropiado. Como se ha dicho, todo depende del transductor que se emplee en cada caso.

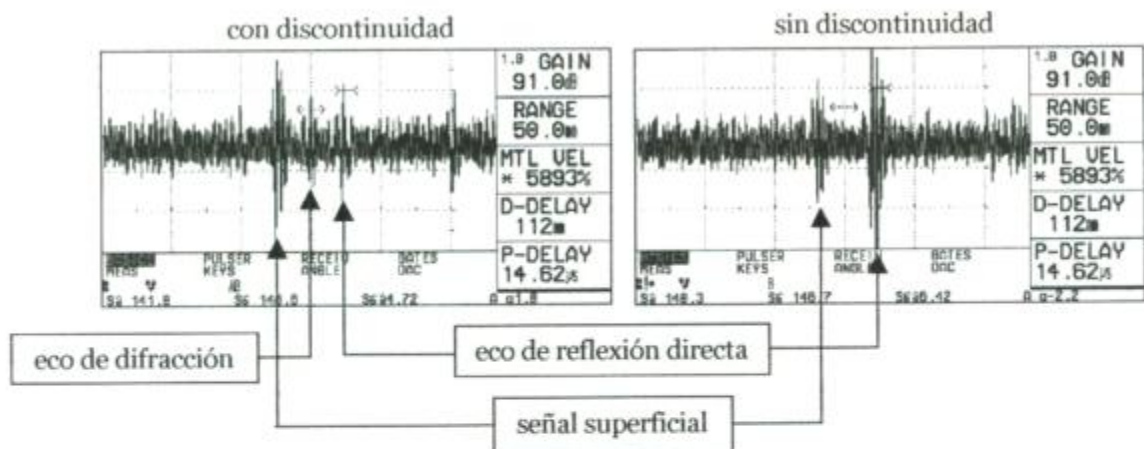


Fig. 6.7 Señal característica proveniente del lado opuesto de ranura, técnica C, transductores WSY-70 de 4 MHz, onda longitudinal.

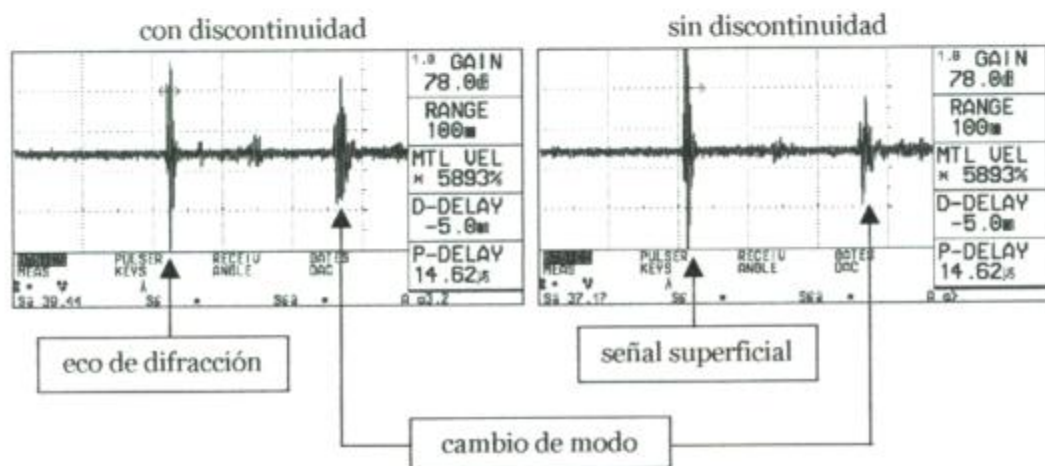
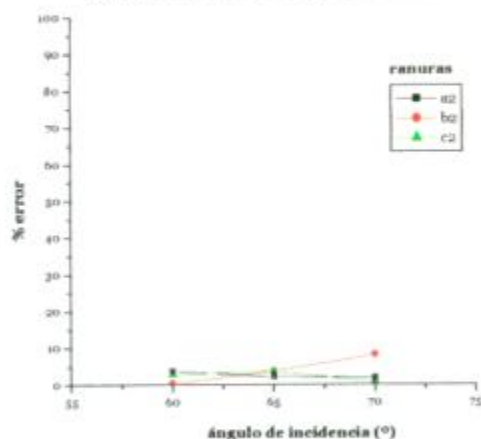


Fig. 6.8 Señal característica proveniente del lado de ranura, técnica C, transductores WSY-70 de 4 MHz, onda longitudinal.

Gráfico 6.4. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia, para la técnica A, lado opuesto de ranura.



Para la técnica B, se obtienen errores grandes para el lado opuesto de la ranura (gráfico 6.5) y estos disminuyen para el lado de la ranura (gráfico 6.6).

Gráfico 6.5. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia, para la técnica B, lado opuesto de ranura.

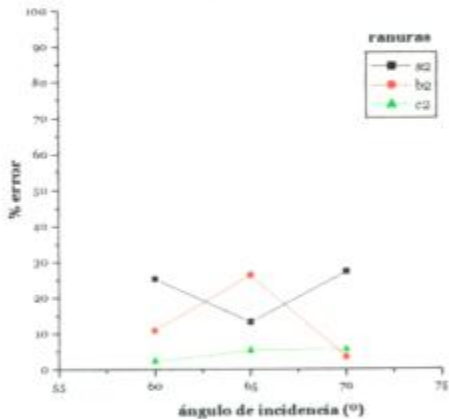
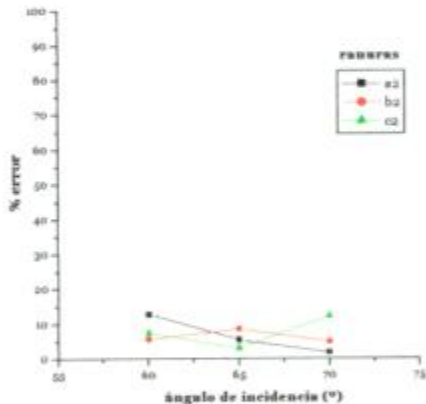


Gráfico 6.6. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia, para la técnica B, lado de ranura.



Los errores mostrados en esta parte donde se han empleado ondas longitudinales y principalmente para la técnica C, al ser comparados con los obtenidos en las otras probetas es bastante alto pero esto no refleja más que la dificultad que se tiene para identificar las señales difractadas entre los demás ecos presentes. Muchas veces pasa que al tratar de maximizar una determinada señal se pierde de vista la simetría que deben tener los transductores respecto de la ranura estudiada, lo que influye de una manera negativa sobre el porcentaje de error con que se ha hecho el dimensionamiento.

Gráfico 6.7. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica C, lado opuesto de ranura.

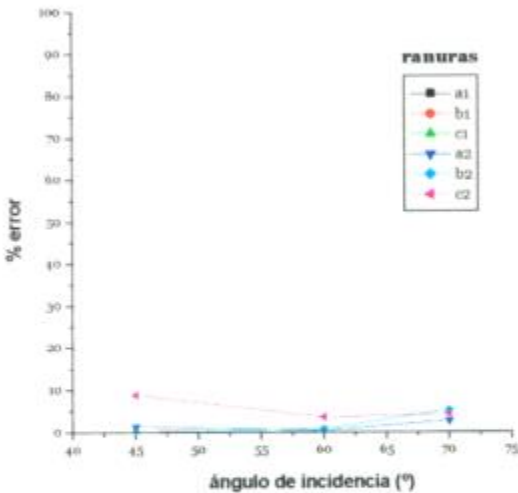
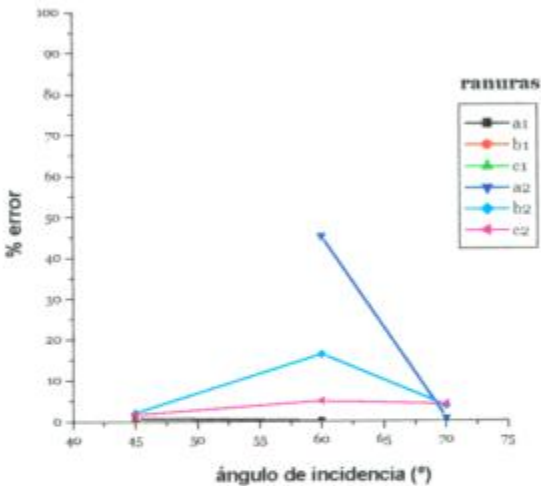


Gráfico 6.8. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica C, lado de ranura.



6.1.3 Probetas No. 3 y No. 4

El objetivo que se persigue con la construcción de esta clase de probetas, cuyas ranuras se encuentran ubicadas en un cierto ángulo respecto de la superficie, es el de comprobar que las técnicas A, B y C no son del todo adecuadas para el estudio de este tipo de discontinuidades. Sin embargo, basándose en ciertas observaciones hechas al respecto, se puede saber cuándo existe una discontinuidad inclinada y así poder aplicar la técnica D, la cual nos ofrece una alternativa más para conocer la verdadera longitud de la ranura y además, el ángulo con el cual se encuentra orientada.

Cada vez que se estudia una ranura, se trata de identificar el eco de difracción y si es posible el eco de reflexión directa, de acuerdo a ello se trata de obtener la dimensión haciendo la diferencia con el espesor de la probeta; dicho de otra forma, la dimensión se determina por simple trigonometría. Pero lo anterior no es condición suficiente para tener una precisión bastante alta. Para el caso de discontinuidades ubicadas a cierto ángulo respecto de la superficie, también es posible observar un eco de difracción y otro de reflexión directa según la técnica y la posición del transductor, pero a la hora de realizar la diferencia con el espesor de probeta se cometen errores muy altos como veremos más adelante. Y este es uno de los cuidados que se deben tener al inspeccionar piezas reales, que aunque tengamos dos ecos bien definidos y eso nos permita realizar el dimensionamiento siempre se debe conocer de alguna forma aunque sea aproximada, la orientación de la discontinuidad.

Para las técnicas A y B se pueden distinguir perfectamente el eco de difracción y el eco de fondo cuando se les observa desde el lado opuesto de la ranura para la posición mostrada en la figura 6.9. También es posible tener cambios de modo y otras reflexiones principalmente cuando la ranura posee ángulos de inclinación menores a 45° respecto de la superficie de la pieza.

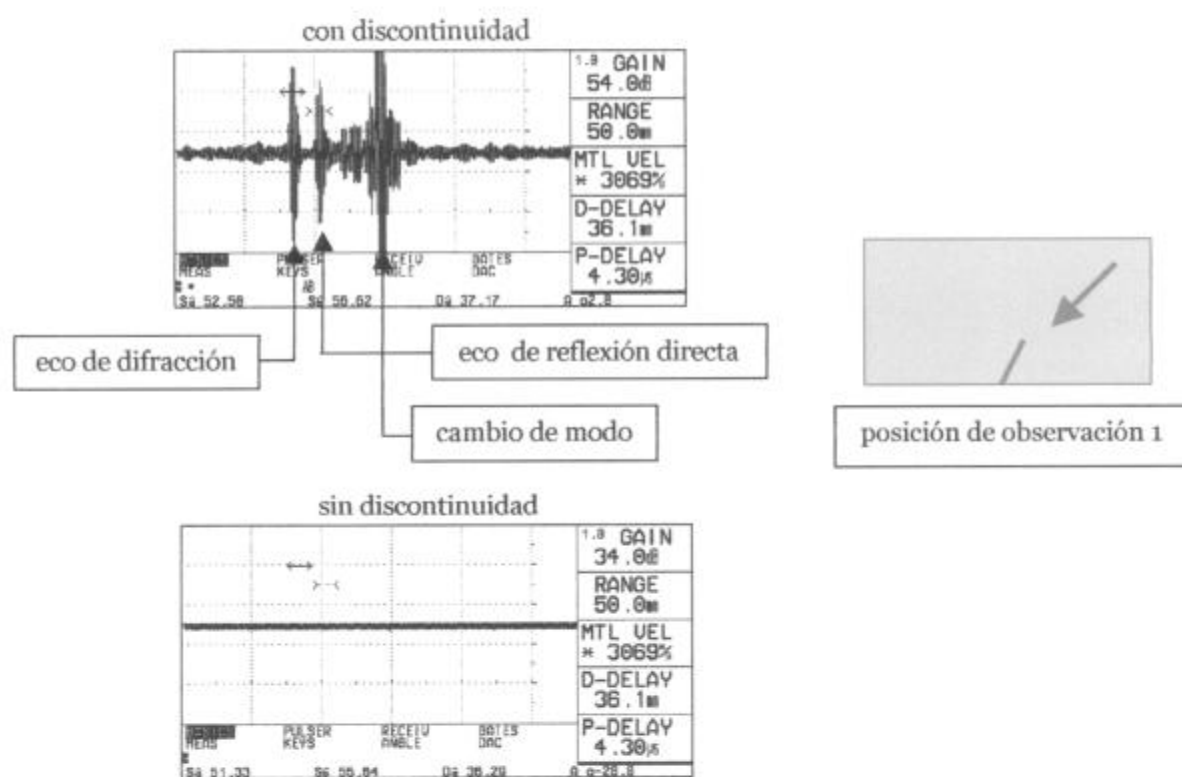


Fig. 6.9 Señal característica proveniente del lado opuesto de ranura, posición1, técnicas A, B y D, transductores MWB-45 de 4 MHz, onda transversal.

Para el mismo caso anterior pero visto desde una posición 2 sucede que para ranuras cuyo ángulo de inclinación es bajo como por ejemplo 20° , es un tanto difícil obtener un buen eco de reflexión directa debido a las reflexiones que se dan de forma desfavorable respecto la posición observada, tal y como se puede apreciar en la figura 6.10. En este caso la señal de reflexión aparece antes que la de difracción debido a la geometría propia de la ranura y eso produce un gran problema para el dimensionado ya que se tienden a solapar ambas señales.

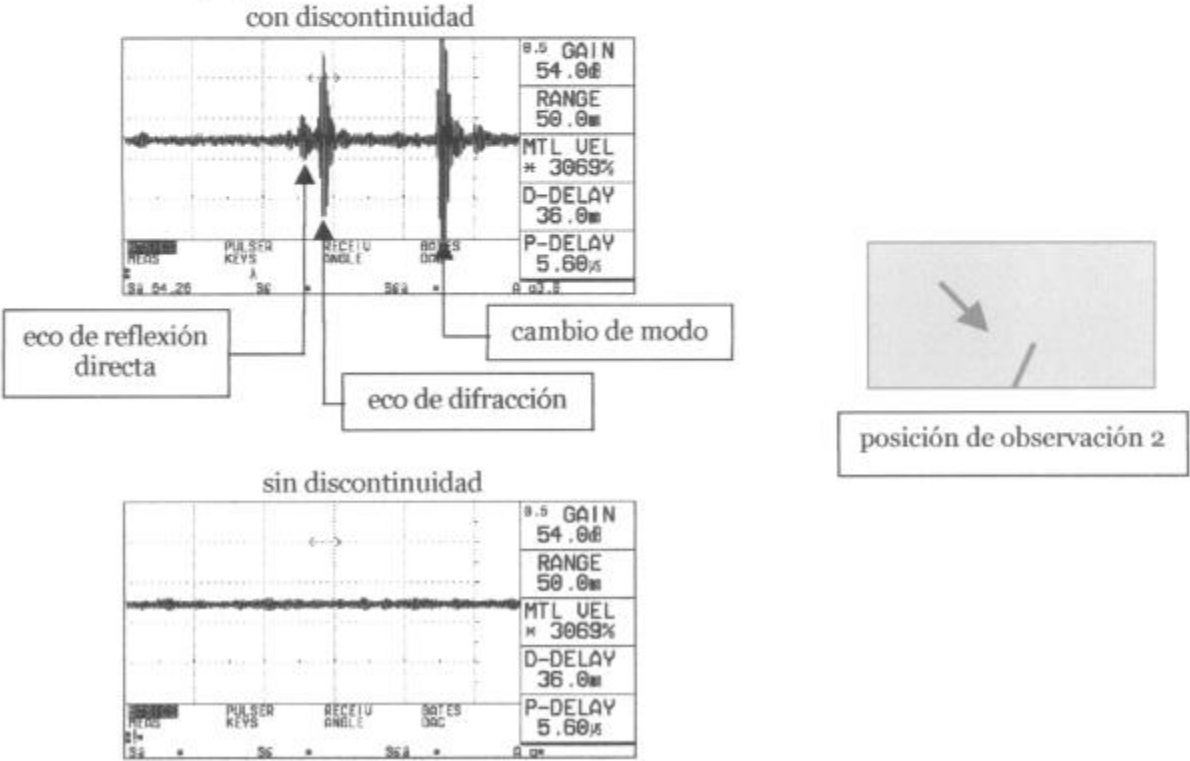


Fig. 6.10 Señal característica proveniente del lado opuesto de ranura, posición 2, técnicas A, B y D, transductores MWB-60 de 4 MHz, onda transversal.

Empleando la técnica B pero realizando el barrido desde el lado de la ranura sucede algo muy similar a los casos anteriores, donde para los ángulos de inclinación bajos como el de 20° existen reflexiones que provocan gran dificultad para identificar el eco de difracción. Este problema va desapareciendo conforme la ranura tiende a estar en una posición perpendicular respecto de la superficie donde se ubica (fig. 6.11).

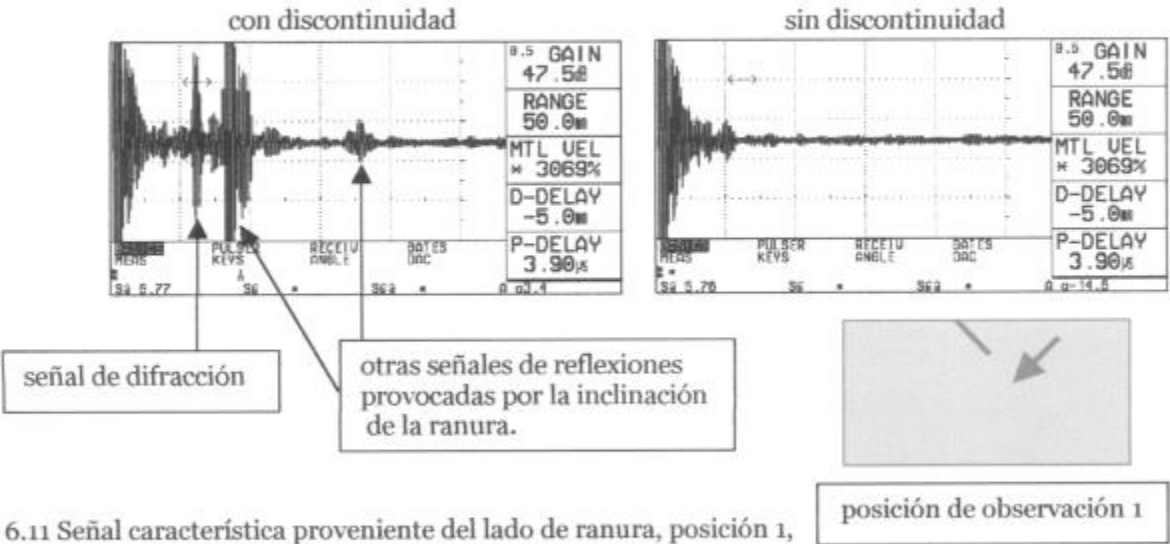


Fig. 6.11 Señal característica proveniente del lado de ranura, posición 1, técnica B, transductor MWB-45 de 4 MHz, onda transversal.

Realizando lo mismo desde una posición 2, generalmente no se aprecia ninguna señal ya que el haz y la discontinuidad se encuentran orientados en la misma dirección. Quizás exista una pequeña porción dentro de la divergencia del haz que incida sobre la ranura pero en nuestro caso no se aprecia ninguna señal difractada posiblemente por el hecho de que se encuentre oculta dentro del ruido por tener una amplitud muy baja (fig. 6.12).

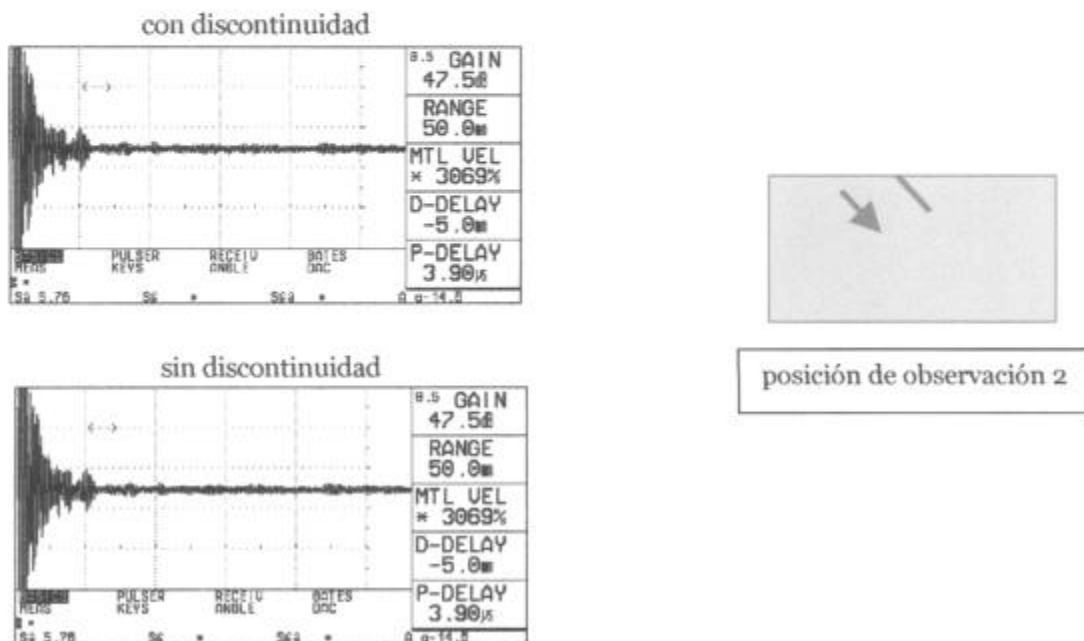


Fig. 6.12 Señal característica proveniente del lado de ranura, posición 2, técnica B, transductor MWB-60 de 4 MHz, onda transversal.

Todas las observaciones antes descritas son importantes porque ayudan a identificar la orientación de las discontinuidades respecto de la superficie. Si obtuviéramos comportamientos distintos de la señal cuando se observa desde una posición y luego de otra como se ha visto, eso significa que quizás estemos en presencia de discontinuidades orientadas con cierto ángulo. Se dice que es probable que sea así porque en la práctica esto puede cambiar según sea la naturaleza de la discontinuidad estudiada; no se puede hablar en forma definitiva respecto de una técnica o de una posición determinada ya que esto cambia para cada caso específico que se tenga. Pero si de una forma u otra nos aseguramos de que la discontinuidad se encuentra ubicada a cierto ángulo, lo recomendable en ese caso es emplear la técnica D, a la cual se referirá más adelante.

Hablando ahora de la técnica C, pues como técnica no ofrece ninguna dificultad y comparándola con las señales recibidas en la probeta No. 2, no existe diferencias apreciables (fig. 6.13). Se distinguen bien los ecos de difracción y el de reflexión directa en caso del lado opuesto de la ranura. Y este es precisamente el cuidado que se debe tener con esta técnica porque a diferencia de la técnica A y B, ésta al cambiar la posición de observación no existe ninguna diferencia. Por lo tanto es necesario realizar un barrido previo con otra técnica antes de aplicar la C porque podríamos estar cometiendo un error al subestimar la dimensión real de la ranura. Del lado de las ranuras inclinadas existe también grandes dificultades para identificar las señales de difracción especialmente por la baja amplitud que estas ofrecen y unido a esto, la propia orientación de la ranura hace que no se observe ninguna señal incluyéndose aquí los cambios de modo y otras reflexiones que se tenían con las técnicas A y B (fig. 6.14).

Respecto de la técnica D podemos decir que es bastante confiable a la hora de dimensionar ranuras inclinadas. Los datos se adquieren de forma independiente de un lado y del otro de la discontinuidad y únicamente empleando barridos desde el lado opuesto. Las mediciones hechas en cada lado contienen información importante para dimensionar y comprobar el ángulo de inclinación con el que se encuentra orientado el defecto. Para eso se basa en la observación de los ecos provenientes de la base y de la punta de la ranura y por lo tanto esta influenciada por las dificultades citadas en los métodos anteriores.

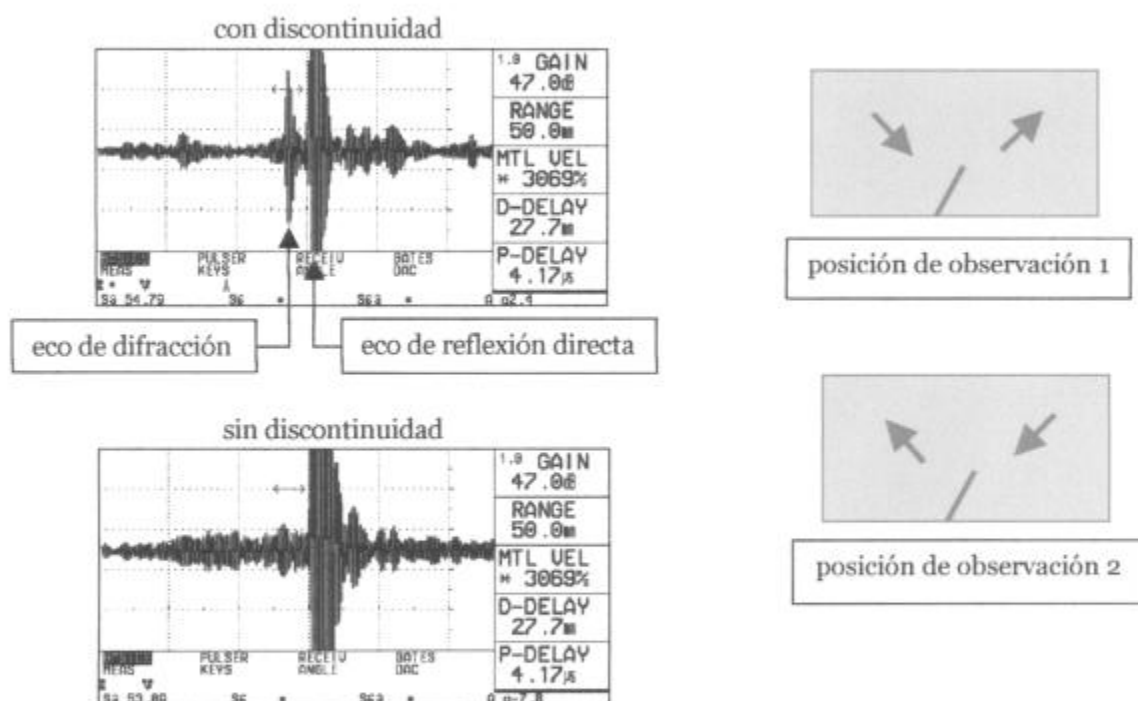


Fig. 6.13 Señal característica proveniente del lado opuesto de ranura, posiciones 1 y 2, técnica C, transductor MWB-45 de 4 MHz, onda transversal.

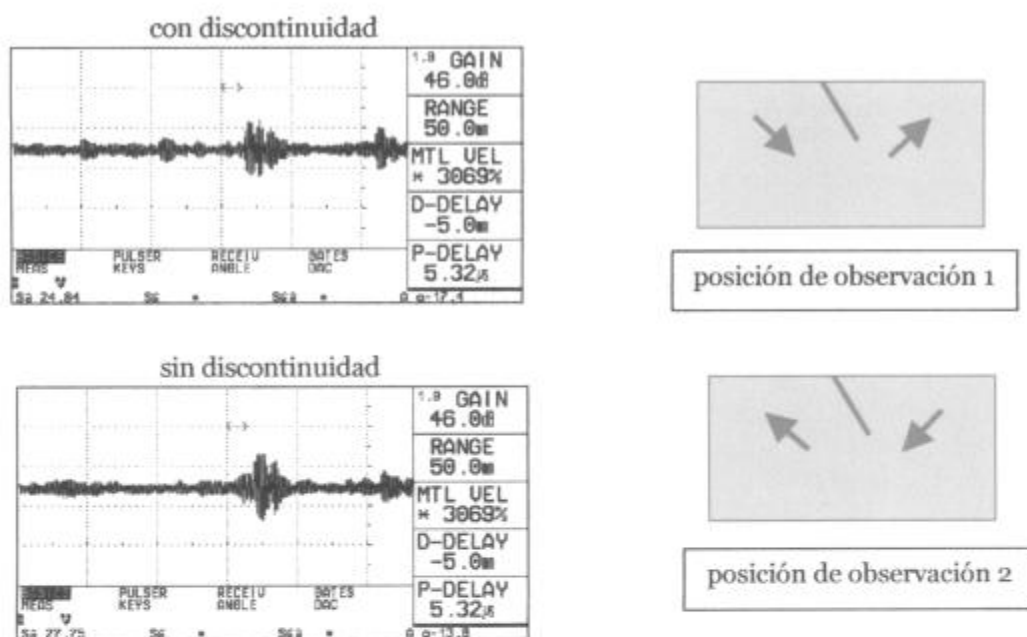


Fig. 6.14 Señal característica proveniente del lado de ranura, posiciones 1 y 2, técnica C, transductor MWB-60 de 4 MHz, onda transversal.

Por último, es importante mencionar respecto del tratamiento de errores y de manera muy general para el caso de ranuras inclinadas, que la tendencia del error es aumentar cuando los ángulos de inclinación son pequeños como por ejemplo 20° . A partir de ahí el error tiende a ir disminuyendo conforme dicho ángulo va aumentando hasta llegar a los 90° que es el caso de las discontinuidades perpendicularmente orientadas respecto de la superficie como en el caso de las estudiadas en la probeta No. 2. La razón de este aumento en el error corresponde a la subestimación de la dimensión real de la ranura al ser comparada con el espesor total de la probeta. O sea que a menor ángulo de inclinación menor será la dimensión respecto del espesor de la probeta y por lo tanto el error será muy grande (hasta del 90% en algunos casos), mientras que a mayor ángulo de inclinación la dimensión será aproximadamente la real y por lo tanto el error disminuirá.

Gráfico 6.9. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica A, lado opuesto de ranura, posición 1.

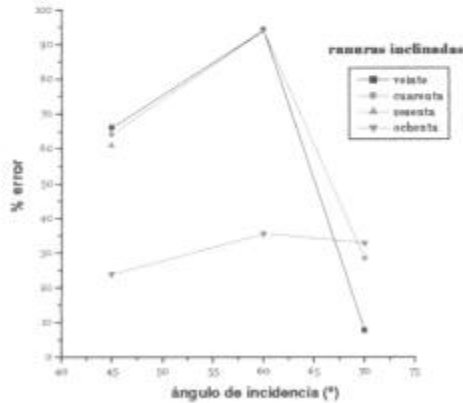


Gráfico 6.10. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica A, lado opuesto de ranura, posición 2.

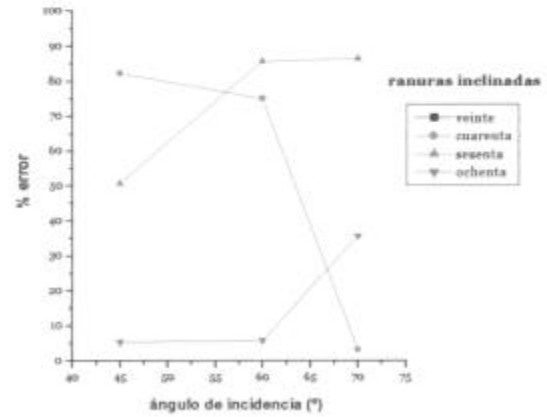


Gráfico 6.11. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica B, lado opuesto de ranura, posición 1.

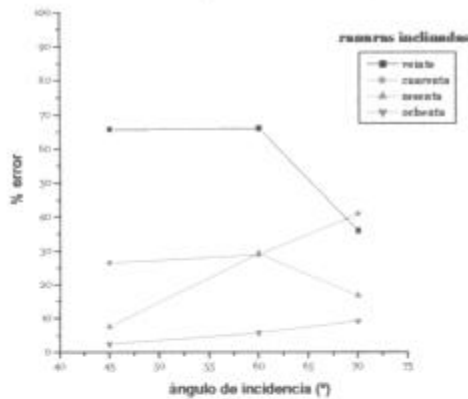


Gráfico 6.12. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica B, lado opuesto de ranura, posición 2.

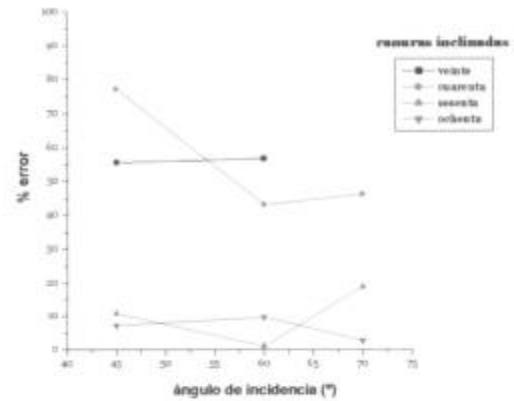


Gráfico 6.13. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica B, lado de ranura, posición 1.

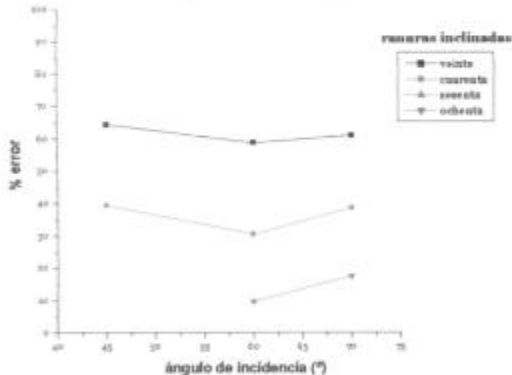


Gráfico 6.14. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica B, lado de ranura, posición 2.

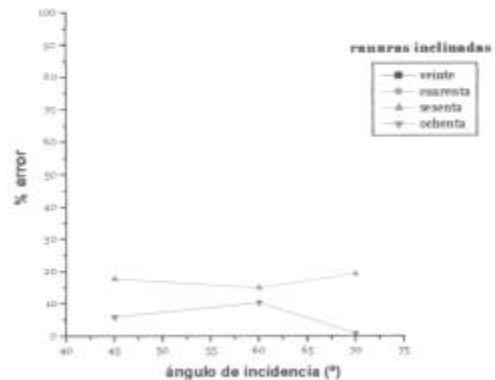


Gráfico 6.15. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica C, lado opuesto de ranura, posición 1.

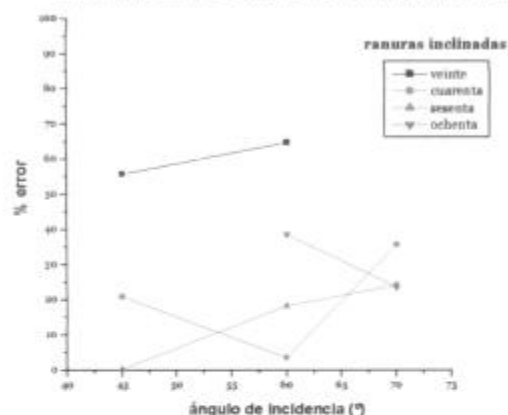


Gráfico 6.16. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica C, lado opuesto de ranura, posición 2.

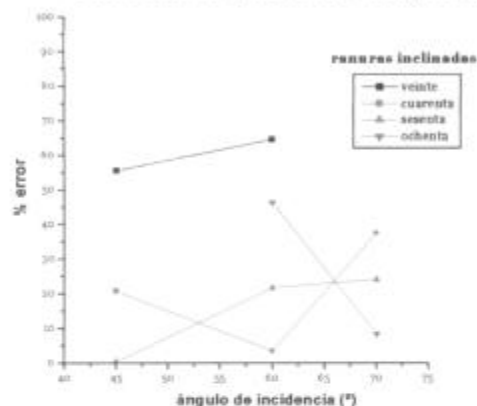


Gráfico 6.17. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica C, lado de ranura, posición 1.

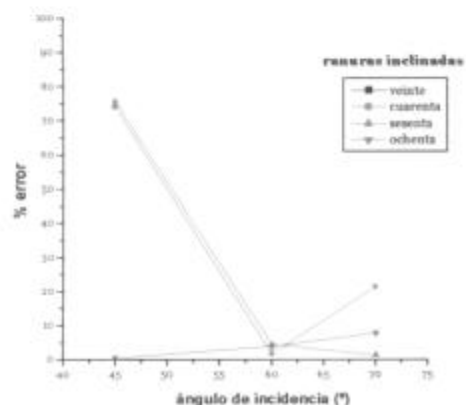
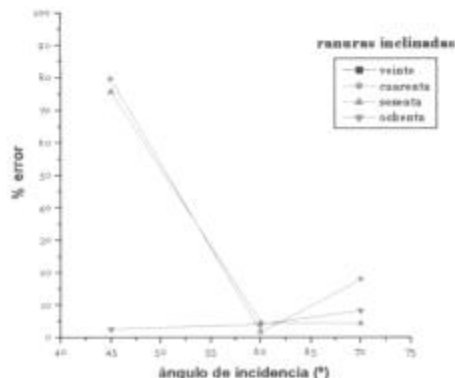
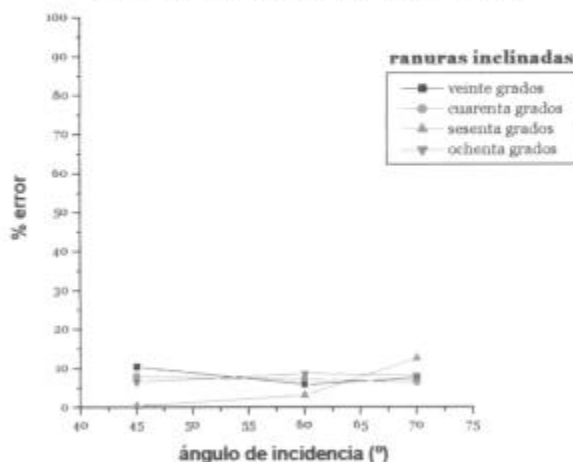


Gráfico 6.18. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica C, lado de ranura, posición 2.



Con el objetivo de disminuir los errores cometidos con las técnicas A, B y C los cuales son muy altos para estas dos probetas, es que se ha utilizado la D y del gráfico 6.19 se observa que dichos errores son bastante bajos. Cabe destacar que para ángulos de inclinación pequeños como el caso de los 20° también existe gran dificultad para adquirir los datos necesarios para el dimensionamiento lo que a final de cuentas también influirá en la precisión de dicha técnica.

Gráfico 6.19. Porcentaje de error vs ángulo de incidencia para la técnica D, lado opuesto de ranura.



Extrayendo lo más importante con todo este análisis hecho es que para el estudio de ranuras inclinadas es conveniente emplear la técnica D ya que los resultados obtenidos son bastante confiables y los porcentajes de error se encuentran dentro de los límites aceptables, esto al realizar barridos desde el lado opuesto a la discontinuidad. Si se necesita estudiar estas ranuras pero desde su propio lado, conviene emplear la técnica C y transductores de onda transversal con ángulo de incidencia de 60° .

6.1.4 Probeta No. 5

Al colocar una ranura en una posición central como la que muestra esta probeta es con el objetivo de estudiar en un solo barrido las dos señales difractadas en cada uno de los extremos de la misma. El dimensionado correspondiente se llevaría a cabo simplemente restando los dos caminos sónicos de las señales difractadas una vez determinada la profundidad p a la que se encuentra el primer extremo de la ranura o bien conociendo la distancia d desde el frente del palpador hasta el punto que marca la posición de la discontinuidad, tal y como se muestra en la siguiente figura.

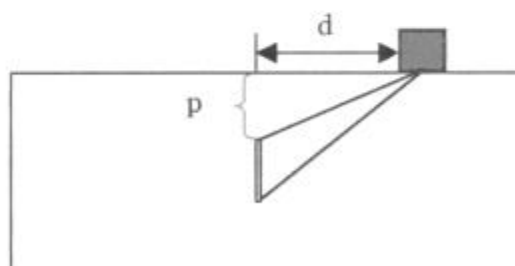


Fig. 6.15 Esquema empleado en la observación de las señales con este tipo de discontinuidad.

El dimensionado de esta ranura no se llevó a cabo por razones que obedecen principalmente a la geometría obtenida a partir de la electroerosión, o sea que la apertura de la ranura era excesivamente superior a la recomendada por la norma BS7706, lo que corresponde para nuestro caso a 0.20 mm en comparación con 1.15 mm que media realmente.

Para tratar de solucionar este problema se procedió a hacerle un mecanizado en ambos extremos con el consecuente aumento de dimensión. Una vez realizado el mecanizado se volvieron a estudiar las señales pero se observó que para una posición en la cual el transductor se encontraba incidiendo en el centro de la discontinuidad no se podían observar las señales difractadas. La única forma de hacerlo era incidiendo sobre el extremo superior o sobre el inferior pero ya de esta forma no sería posible determinar su dimensión desde un solo punto. Dicha dificultad se presentó para las técnicas empleadas, donde en la mayoría de los casos se obtiene o el eco de difracción superior o el inferior pero nunca ambos como es necesario. Incluso con la técnica C se obtuvo una mayor dificultad de interpretación ya que en algunos casos desaparece el eco de reflexión directa el cual sirve para poder identificar otras señales a partir de él, o en otros casos aparecen señales de cambios de modo los cuales pueden estar interfiriendo con los de difracción.

En este como en el resto de los casos en donde se han empleado los transductores de onda longitudinal se necesita una ganancia bastante alta. Además se tienen señales de cambios de modo y reflexiones en el lado opuesto de la probeta, cuya consecuencia es la dificultad de interpretación de las señales presentes. Sin embargo, al estudiar las ranuras con los transductores piezocompuestos de onda longitudinal se observan dos ecos en la posición en la cual se encuentran incidiendo en el centro de la ranura y aunque se sospecha que pueden ser los de difracción, cabe la posibilidad de que estos sean cambios de modo.

Todo lo dicho anteriormente se resume en las siguientes figuras.

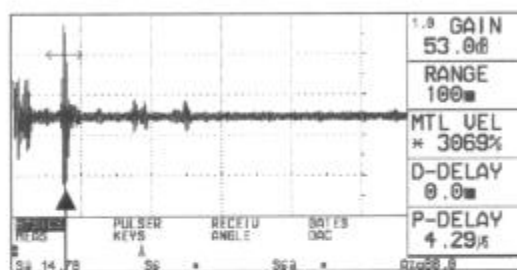


figura al incidir sobre la ranura

señal de difracción proveniente de la punta superior de la ranura

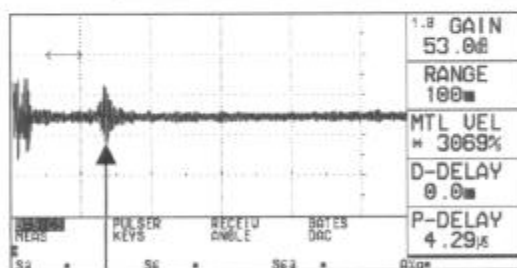


figura al incidir en el medio de la ranura

reflexión de muy baja amplitud localizada en la punta de la ranura

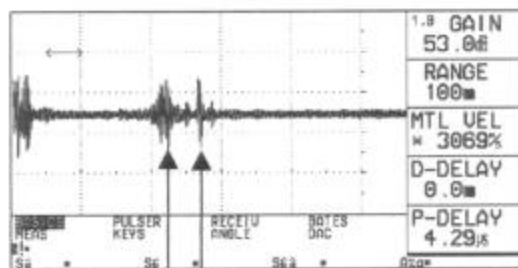
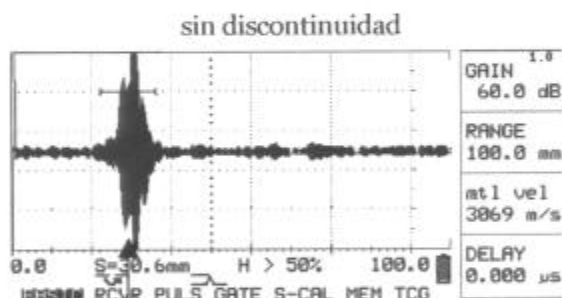
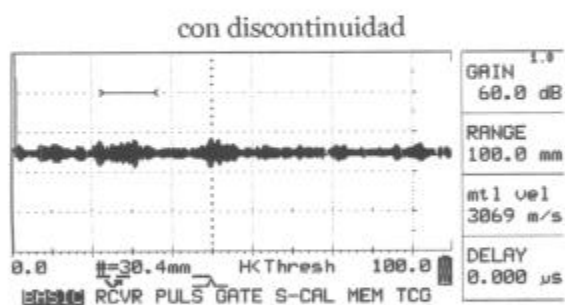


figura al incidir sobre el extremo inferior de la ranura

reflexión especular

eco proveniente de la punta inferior de la ranura

Fig. 6.16 Imágenes obtenidas con la ranura centrada para la técnica B, transductores MWB-60 de 4 MHz, onda transversal.



eco de reflexión directa

Fig. 6.17 Imágenes obtenidas con la ranura centrada para la técnica C, transductores MWB-60 de 4 MHz, onda transversal.

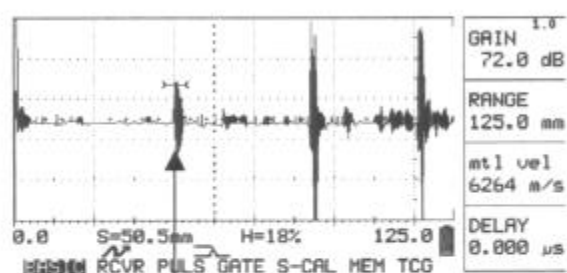


figura al incidir sobre la ranura

señal de difracción proveniente de la punta superior de la ranura

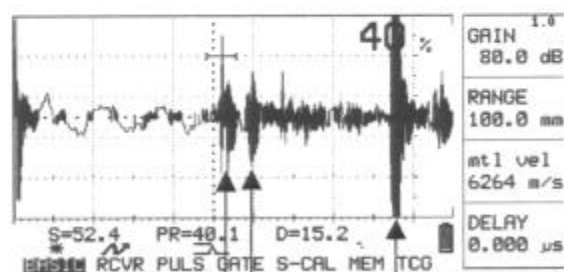


figura al incidir en el medio de la ranura

eco de difracción superior

eco de reflexión

eco de difracción inferior

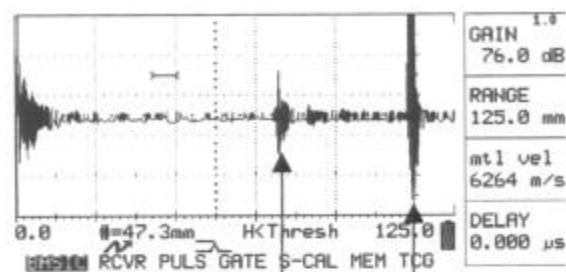


figura al incidir sobre el extremo inferior de la ranura

eco de difracción inferior

eco de reflexión

Fig. 6.18 Imágenes obtenidas con la ranura centrada para la técnica B, transductores piezocompuestos de 65° y 5 MHz.

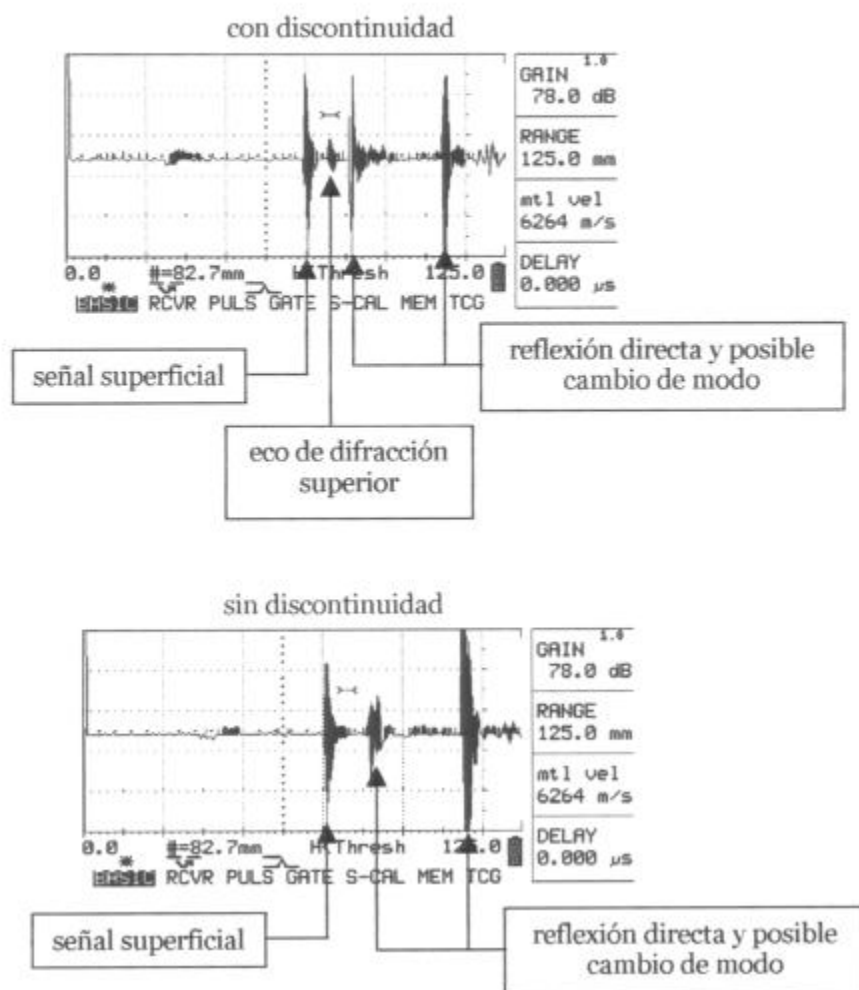


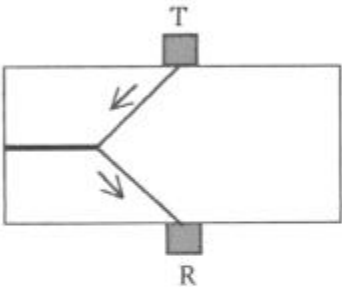
Fig. 6.19 Imágenes obtenidas con la ranura centrada para la técnica C, transductores piezocompuestos de 65° y 5 MHz.

6.1.5 Probeta No. 6

En esta probeta se ha tratado de simular defectos tipo laminaciones o bien grietas causadas por hidrógeno. De este ensayo no se obtuvieron datos numéricos sino que se deseaba conocer como era el comportamiento de las señales ultrasónicas en este tipo de discontinuidades, pero principalmente se quería observar si era posible obtener ecos de difracción en la punta de la ranuras. Al respecto, se debe señalar que los ecos de difracción que se observan con mayor claridad son los de la ranura orientada horizontalmente, o sea, paralela a la superficie de inspección. Como es de esperarse, la primera señal obtenida es la difractada en la punta de la ranura y seguida de esta algunas reflexiones en distintas partes de la probeta y algunos cambios de modo especialmente cuando se emplean palpadores de 60 y 70 grados. Como ha sido una constante en todo el trabajo, los resultados al emplear ondas transversales son mucho más claros que los obtenidos con ondas longitudinales, ya que estos últimos incluyen una mayor cantidad de cambios de modo y reflexiones que hacen muy difícil la interpretación de las señales. Si se deseara dimensionar esta discontinuidad sería necesario tomar en cuenta el eco proveniente de su base así como el difractado y de acuerdo a esto estimar aproximadamente su extensión dentro de la pieza. Por esta razón sería mejor emplear otra técnica como la de ecodinámica aplicando el criterio de la caída de los 6 dB por ejemplo, con transductores de incidencia normal. De esta forma se puede obtener el contorno y extensión aproximada de la discontinuidad. La razón del por qué no es factible realizar el dimensionado de esta discontinuidad es por el hecho de que además del eco de difracción obtenido, es necesario contar con otro u otros que sirvan de referencia como se pudo ver en todas las técnicas anteriores. Pero si suponemos que en todo caso tuviéramos alguno de estos ecos de referencia, se hace también necesario conocer otros datos que si bien es cierto pueden ser calculados de una u otra forma (como por ejemplo diferencias de ángulos), esto no es factible desde el punto de vista práctico y además el objetivo de toda técnica es independizarse de todas aquellas variables que estén fuera de lo que son las señales ultrasónicas. Otra posibilidad de medición podría ser empleando transductores colocados a

cada lado de la pieza estudiada (fig. 6.20) pero esto representa otro inconveniente con el que muchas veces no se puede lidiar en una inspección, el hecho de tener acceso a ambos lados de la pieza.

Fig. 6.20 Otra configuración posible para el estudio de discontinuidades tipo laminaciones.



La ranura orientada en forma vertical respecto de la superficie, no da buenos resultados refiriéndose a las señales observadas. En realidad no se observaron señales con las que se estuviera seguro que fueran difractadas en la punta de la ranura. Sí es posible obtener otras señales que corresponde exclusivamente a las reflexiones que tienen lugar dentro de esta geometría además de los cambios de modo. La única forma de encontrar el inicio de la ranura es incidiendo sobre la base a partir de la cual se extiende y el eco obtenido puede ser analizado gracias a la información que puede dar el equipo de ultrasonido.

Todo lo explicado anteriormente se muestra en las siguientes figuras.

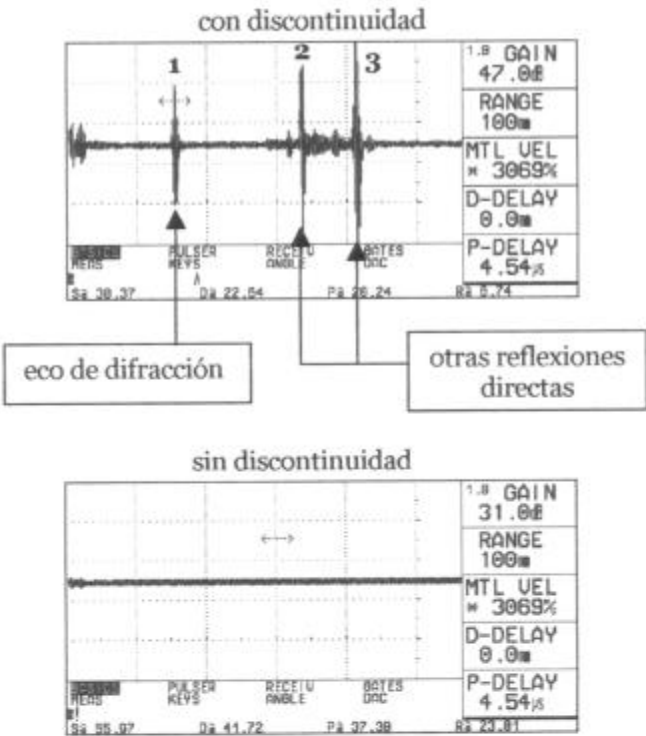




Fig. 6.22 Imágenes obtenidas con la ranura vertical para la técnica B, transductores MBW-45 de 4 MHz, onda transversal.

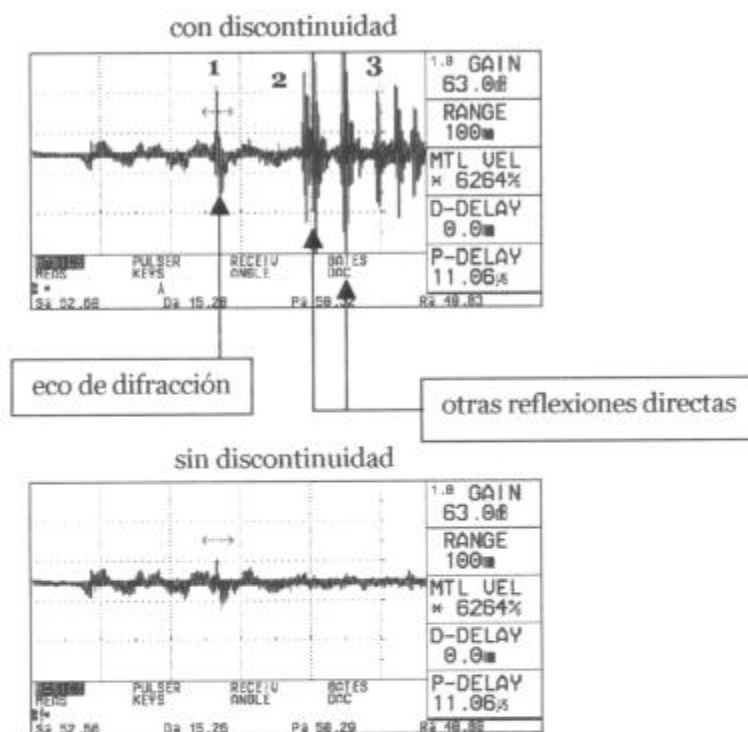


Fig. 6.23 Imágenes obtenidas con la ranura horizontal para la técnica B, transductores piezocompuestos de 65° y 5 MHz, onda longitudinal.

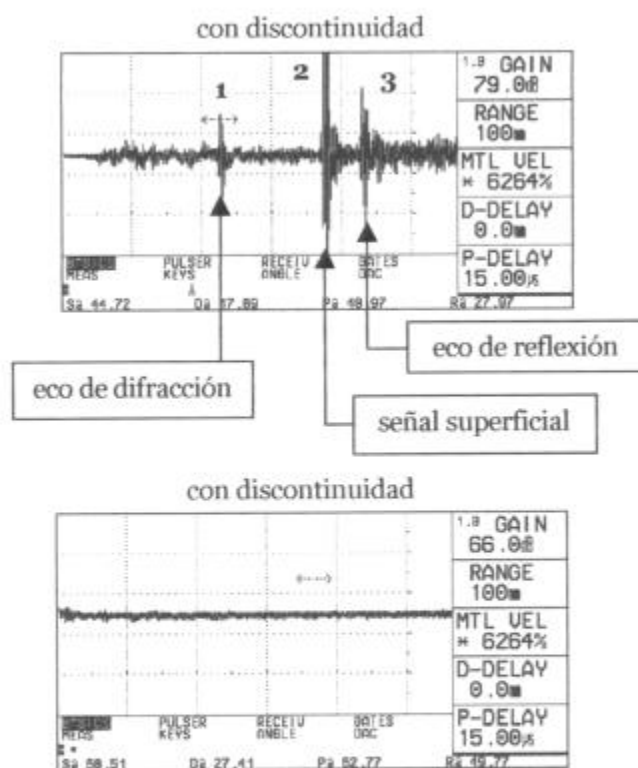


Fig. 6.24 Imágenes obtenidas con la ranura vertical para la técnica B, transductores piezocompuestos de 65° y 4 MHz, onda longitudinal.

6.1.6 Probeta No. 7 y No.8

Con el estudio de las probetas 7 y 8 lo que se pretende es determinar de forma aproximada, la mínima apertura a partir de la cual las fisuras hechas por fatiga son visibles al ultrasonido, mejor dicho, cuándo son visibles las señales de difracción emitidas desde la punta de la fisura. Como se observa en la siguiente figura, la fisura es completamente visible al ultrasonido, o sea que se puede localizar perfectamente el lugar desde donde se extiende, pero a diferencia de la señal de reflexión en el extremo de la misma, la de difracción no se logra ver debido a que la fisura se encuentra tan cerrada que las posibles ondas de difracción que estén siendo emitidas, tienen una amplitud tan baja que se pierden en el ruido obtenido en el ensayo.

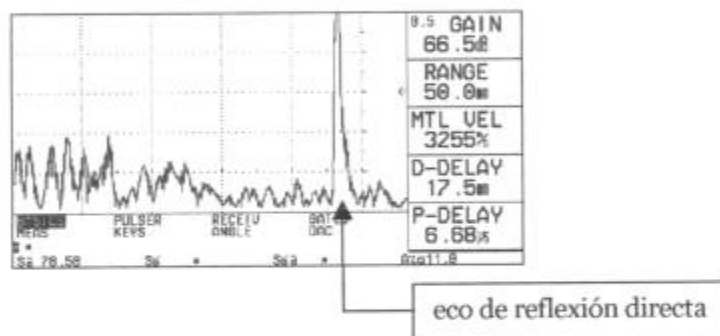


Fig. 6.25 Señal obtenida de las probetas No.7 y No. 8 antes del ensayo, transductor MWB-6o onda transversal, únicamente se observa el eco de reflexión directa en la fisura. No se aprecia ninguna otra señal característica que pueda identificar la de difracción.

Debido a lo dicho anteriormente, se decidió someter a las probetas a un ensayo de flexión en tres puntos y ver hasta qué instante se lograba diferenciar una señal dentro del ruido existente, dicha señal correspondería a la difractada en la punta de la discontinuidad (fig. 6.26). El ensayo de flexión se realiza con control de desplazamiento y se anota el dato de carga en el momento en que aparece el eco de difracción y con estos datos se puede realizar el cálculo para saber la apertura de la fisura en ese instante. Posteriormente se continúa el ensayo hasta que la señal difractada alcance su máximo y se mantenga constante, aunque lo que interesa es el primer dato adquirido únicamente. Lo ideal también sería contar con muchas probetas normalizadas y de diferente material para lograr obtener un dato que sea repetitivo en todas ellas, lo que daría una mayor precisión de cuál es la mínima apertura necesaria para obtener una señal difractada lo suficientemente adecuada para su análisis posterior.

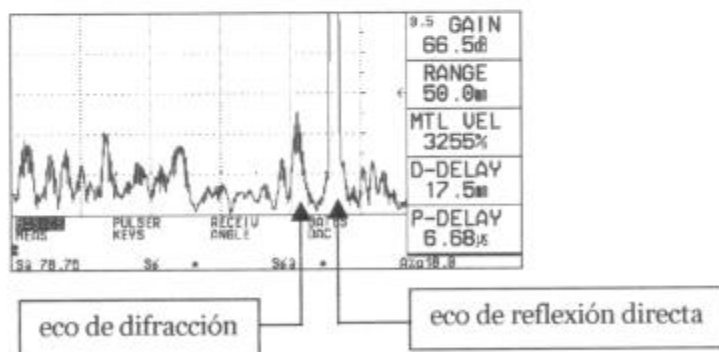
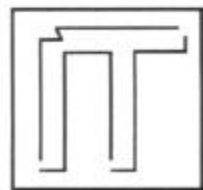


Fig. 6.26 Señal característica de difracción obtenida para las probetas No.7 y No. 8, para una determinada carga durante el ensayo de flexión.

A pesar de que no se trabajó estrictamente con lo recomendado por la norma ASTM E1290 por razones de la geometría propia de las probetas, se obtuvo un dato aproximado de la apertura mínima de la fisura a partir del cual se logra diferenciar perfectamente respecto del ruido de la señal ultrasónica. El dato numérico es de aproximadamente 0.02 mm.

De esta forma se puede dar un rango dentro del cual se pueden diferenciar sin ningún problema las señales de difracción provenientes de diversas ranuras. Como máxima apertura recomendada por la norma BS 7706 se tiene un valor de 0.20 mm ($1/4 \lambda$) y como valor mínimo calculado a partir del ensayo de flexión de aproximadamente 0.02 mm ($1/40 \lambda$), todo esto para los transductores que hemos empleado durante la realización de este trabajo.

Conclusiones



Parte VII: "Conclusiones"

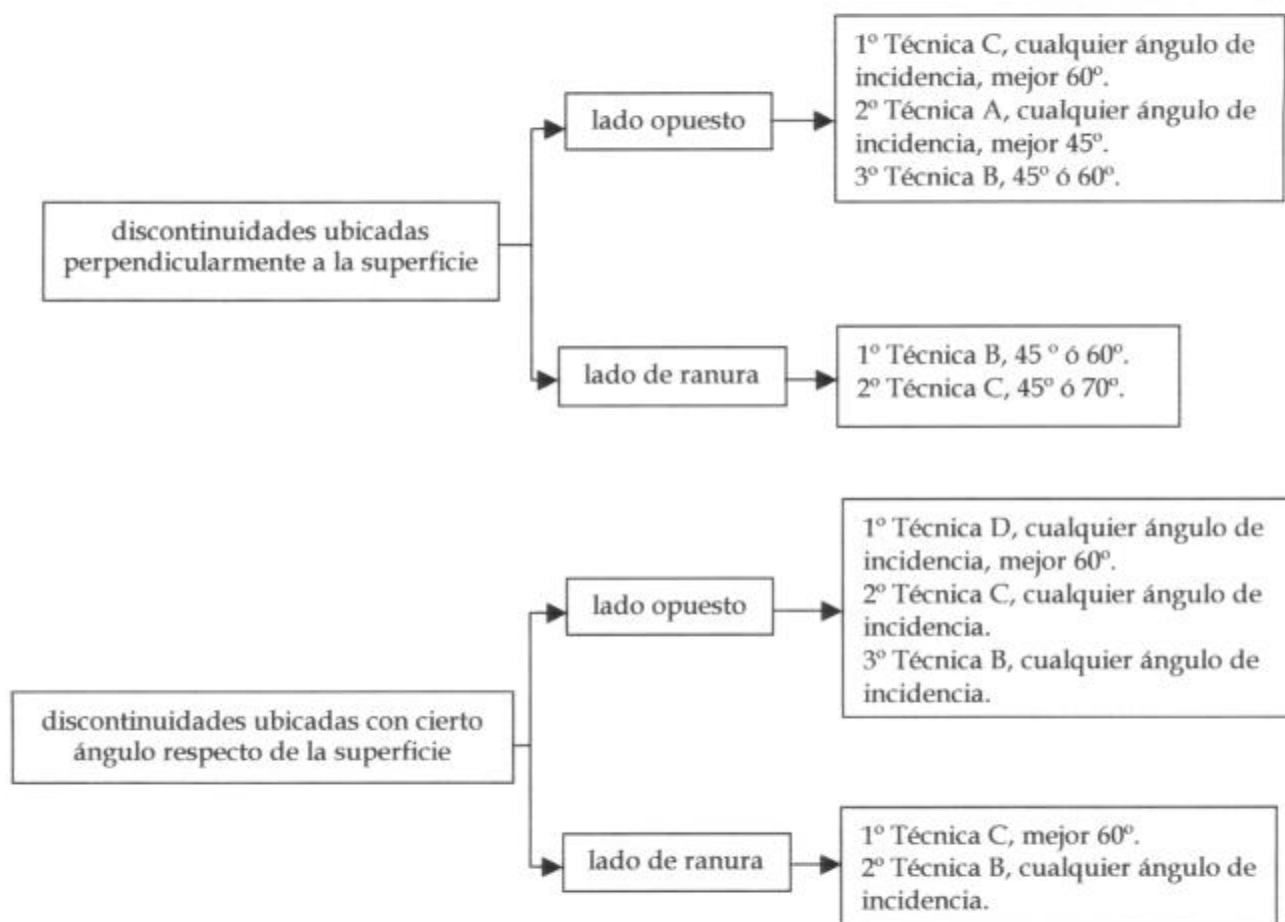
7.1 Construcción de las probetas

- Para realizar un estudio completo de las diferentes señales provenientes de una misma discontinuidad, la probeta debe permitir acceder a dicha imperfección (geometría adecuada) desde cualquier punto de donde se quiera observar.
- Las probetas que se fabrican y que van a cumplir el papel de bloque de calibración, deben tener discontinuidades lo más parecidas a las que se puedan obtener en la realidad.
- Un valor de atenuación aceptable en un material que va a ser utilizado como bloque de estudio (0.01 dB/mm) facilita la observación de las señales tanto difractadas como reflejadas.
- Un buen mecanizado de las probetas a utilizar influye sobre las señales observadas especialmente sobre aquellas que se propagan por dicha superficie.

7.2 Dimensionamiento de discontinuidades

- La selección de la frecuencia de trabajo (4 y 5 MHz) ha sido basada en la resolución, relación señal-ruido y los cálculos de atenuación de los materiales empleados. Dichas frecuencias ofrecen una condición ideal para los ensayos.
- Las mediciones realizadas y el cálculo de las dimensiones de las discontinuidades no dependen de la amplitud de las señales difractadas, sin embargo, es necesario tener una buena relación señal-ruido para poder identificarlas.
- En la zona denominada campo cercano del transductor, las mediciones no son confiables ya que existe una gran variación en la amplitud, o sea, que es una zona que presenta una relación S/R baja.
- Las mediciones realizadas se observan mejor empleando los transductores de onda transversal mientras que los de onda longitudinal ofrecen mayor dificultad de interpretación porque aparecen muchos cambios de modo y otras señales de reflexión no deseadas.
- El estudio de discontinuidades pequeñas debe ser llevado a cabo con transductores de alta resolución ya que si se emplearan transductores convencionales aumenta el grado de incertidumbre con que se realiza la medición y es muy posible la no observación de las señales difractadas.
- Las señales difractadas poseen una amplitud muy baja respecto de las señales reflejadas donde en la mayoría de los casos alcanza un valor de hasta -20 dB o mayor.
- En los ensayos donde se estudien señales de difracción la relación señal-ruido debe ser lo más alta posible, debido a que dichas señales poseen una muy baja amplitud.
- Durante la realización de un ensayo siempre debe existir un mecanismo que permita alinear los transductores respecto de la discontinuidad estudiada, ya que esto permite estudiar las variaciones de las señales independientemente de los cambios que puedan sufrir por los movimientos del palpador hechos manualmente.
- Ya que en los casos de inspección reales no se sabe la orientación de las discontinuidades, siempre se debe hacer un estudio previo y de acuerdo con lo observado, escoger la técnica que mejor se adapte y que mejores resultados ofrezca.

- Cuando sea necesario reducir la cantidad de mediciones se puede utilizar únicamente el dato correspondiente a la máxima amplitud de la señal difractada ya que produce un error muy bajo.
- La menor profundidad de ranura detectable para las condiciones de ensayo es de 10 mm.
- El porcentaje de error aumenta conforme disminuye el ángulo de inclinación de la ranura respecto de la superficie de probeta.
- El límite a partir del cual los errores empiezan a ser significativos (mayores al 5%) es para una inclinación de ranura de 80° o menores.
- Se sabe que no es posible generalizar los resultados obtenidos a partir de las técnicas empleadas en este trabajo, pero a continuación se muestra un esquema que puede servir de guía en caso de alguna inspección en particular, cuando se emplean ondas transversales.



7.3 Construcción de zapatas

- La geometría con la que se construye una zapata influye sobre la calidad y definición de las señales que pueden aparecer en una determinada inspección.
- Además del material atenuante, el hecho de realizar un acabado escalonado en la superficie donde llegan las señales reflejadas, hace que dichas señales se dispersen, facilitando la interpretación de la información que aparece en el equipo.
- Cuando una zapata se hace a partir de un material cuya impedancia acústica sea alta (como en el caso de algunos acrílicos), el camino recorrido por el ultrasonido debe ser lo más corto posible para evitar pérdidas de energía acústica.

7.4 Ensayo de flexión

- La geometría de las probetas que se van a someter a ensayos sea de fatiga o de flexión, deben cumplir con las dimensiones recomendadas por la norma correspondiente pero a su vez, deben permitir también un fácil y completo estudio con ultrasonido cual sea la técnica y los palpadores que se utilicen para ello.
- Para obtener un mejor análisis y seguimiento de la señal difractada conforme se va abriendo una discontinuidad a través del ensayo de flexión, se deben adquirir las imágenes en tiempo real, esto permitiría apreciar mejor el momento a partir del cual dicha señal sea lo suficientemente apreciable por el ultrasonido.
- Un límite inferior para la apertura en la punta de la ranura a partir de la cual las señales de difracción ultrasónica son distinguibles respecto del ruido, cuando se emplean ondas transversales y transductores MBW, es de aproximadamente $1/40$ de λ .

Desarrollos a Futuro



Parte VIII: "Desarrollos a futuro"

Algunos de los aspectos a tener en cuenta en ensayos que se realicen en un futuro se citan a continuación:

- Emplear probetas cuyas ranuras tengan una menor apertura que las empleadas en este trabajo, similares a las obtenidas mediante fatiga.
- Realizar ensayos de flexión apegándose más fielmente a lo establecido por la norma ASTM E1290-93. También conviene realizar más ensayos para establecer una apertura de ranura con más precisión que la obtenida en esta oportunidad.
- Tratar de implementar las técnicas estudiadas en aquellos componentes que por su función, poseen fisuras del tipo fatiga o similares, esto con el objetivo de adquirir mayor experiencia de campo y a su vez mejorar lo obtenido en el laboratorio.
- Un punto muy importante que debe llevarse a cabo es la representación tipo B de los datos adquiridos mediante mecanismos de barrido semiautomáticos. Esto se logra digitalizando todas las posiciones relacionándolas con las ondas de radiofrecuencia, las cuales son cuantizadas en amplitud y utilizando una escala de grises se provee de un patrón de diferenciación cuando una serie de barridos tipo A se apilan formando de esta manera, una imagen seccional del barrido representando en escalas lineales la profundidad y la distancia a lo largo del material inspeccionado, tal y como se aprecia en la siguiente figura.

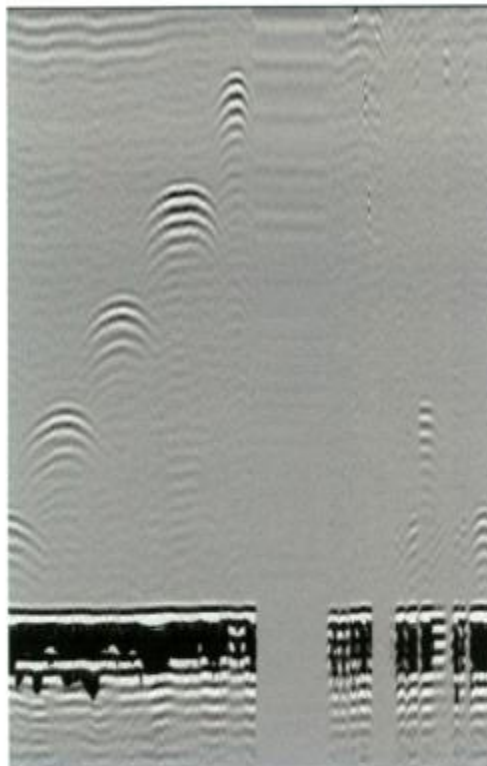
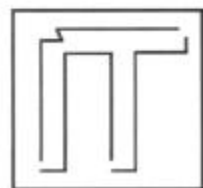


Fig. 8.1 Presentación de una imagen ultrasónica tipo B, realizada con un transductor normal de 4 MHz, onda longitudinal. Las señales observadas son de difracción las cuales tienen su origen en agujeros hechos a diferentes profundidades en la probeta.

Referencias Bibliográficas

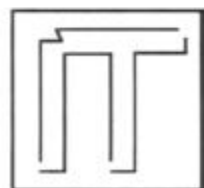


Referencias bibliográficas

1. Graham K. A brief introduction to ultrasonic. September 1999.
2. ASM. Handbook of Nondestructive Evaluation and Quality Control, Ultrasonic Inspection, vol. 17. Estados Unidos, ASM, 1989. pp. 231-232.
3. Szilard J. Ultrasonic Testing, Physical Principles of Ultrasonic Testing, chap. 1. England, John Wiley & Sons Ltd, 1982. pp. 1-3.
4. ASM. Handbook of Nondestructive Evaluation and Quality Control, Ultrasonic Inspection, vol. 17. Estados Unidos, ASM, 1989. pp. 233-234.
5. ASM. Handbook of Nondestructive Evaluation and Quality Control, Ultrasonic Inspection, vol. 17. Estados Unidos, ASM, 1989. pp. 234-235.
6. INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial). Métodos de ensayos no destructivos, Ultrasonidos, tomo I, cap. 3. Cuarta edición, Madrid, 1996. pp. 353-361.
7. M. Berke. Nondestructive Material Testing with Ultrasonics, Introduction to the Basic Principles, vol. 5, N° 9, part 4., Krautkramer, September 2000.
8. ASM. Handbook of Nondestructive Evaluation and Quality Control, Ultrasonic Inspection, vol. 17. Estados Unidos, ASM, 1989. pp. 238-240.
9. INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial). Métodos de ensayos no destructivos, Ultrasonidos, tomo I, cap. 3. Cuarta edición, Madrid, 1996. pp. 417-427.
10. M. Berke. Nondestructive Material Testing with Ultrasonics, Introduction to the Basic Principles, vol. 5, N° 9, part 4.3. , Krautkramer, September 2000.
11. J. Krautkramer, H. Krautkramer. Physical Principles of the Ultrasonic Testing of Materials, part A. 4th Ed., Springer-Verlag, Germany 1990. pp. 167-239.
12. Mundry E. Ensayos No Destructivos de Materiales, Ultrasonido. INTI, 1968. pp. 94-96.
13. Charlesworth J. P.; Temple J. A. G. Engineering Applications of Ultrasonic Time of Flight Diffraction. Research Studies Press Ltd, England, 1989. pp. 1-2.
14. Apuntes de la Maestría, Fundamentos de Mecánica de Fractura, parte 2.
15. INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial). Métodos de ensayos no destructivos, Ultrasonidos, tomo I, cap. 3. Cuarta edición, Madrid, 1996. pp. 391-392.
16. McNab A.; Muir G. Flaw Sizing of Real Defects. British Journal of NDT, May 1978. pp. 130-134.
17. INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial). Métodos de ensayos no destructivos, Ultrasonidos, tomo I, cap. 3. Cuarta edición, Madrid, 1996. pp. 596-605.
18. Ed Ginzel, Ultrasonic Inspection II, Training for Nondestructive Testing and Variables Affecting Test Results, vol. 4, No. 6. NDT Net, June 1999.
19. INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial). Métodos de ensayos no destructivos, Ultrasonidos, tomo I, cap. 3. Cuarta edición, Madrid, 1996. pp. 462-466.

20. Charlesworth J. P.; Temple J. A. G. Engineering Applications of Ultrasonic Time of Flight Diffraction. Research Studies Press Ltd, England, 1989. pp. 4-6.
21. Silk M. G. Research Techniques in Non-Destructive Testing, Sizing Crack-like Defects by Ultrasonic Means, vol. 3. Academic Press. pp. 53-57.
22. Hecht E.; Zajac A. Optica, traducción de la primera edición. Addison Wesley Longman, México, 1986. pp. 350-421,.
23. T. Just; G. Csapo. Ultrasonic crack depth measurement of surface bracking cracks in piping, vol. 2, No. 9. NDT Net, September 1997.
24. British Standard 7706. Calibration and setting-up of the ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) technique for the detection, location, and sizing of flaws, part 5.2.
25. Browne B. Time-of-Flight Diffraction It's Limitations, Actual and Perceived, vol. 2, No. 9. NDT Net, Setiembre 1997.
26. Trimborn N. The Time-of-Flight-Diffraction-Technique, vol. 2, no. 9. NDT Net, September 1997.
27. J. Kraukramer, H. Krautkramer. Physical Principles of the Ultrasonic Testing of Materials, part A. 4th Ed., Springer-Verlag, Germany 1990. pp. 108-116.
28. Technical Reference and Operating Manual USD 15 Series, Krautkramer, Germany.
29. Technical Reference and Operating Manual USN Series, Krautkramer, Germany.
30. Standards ASTM; vol. 03.03, section 3, 1999 E 1065-98 Standard Guide for Evaluating Characteristics of Ultrasonic Search Units.
31. INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial). Recomendaciones para el ensayo por ultrasonidos de materiales metálicos por el método de contacto. Norma 110422, Madrid, 1981. pp. 1-22.
32. Apunte de Teoría de Errores, física I, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA.
33. Standards ASTM; vol. 03.01, section 3, 1999 E 1290-93 Standard Test Method Guide for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement.
34. Gordon J. R. The Welding Institute procedure for the determination of the fracture resistance of fully ductile metals. No. 275, 1985. pp. 1-5.

Anexos



Anexo 1					
Acoustic Properties of Materials					
Material	Longitudinal Velocity		Shear Velocity		Acoustic Impedance
	(in/μs)*	(m/s)	(in/μs)*	(m/s)	(Kg/m ² s x 10 ⁶)
Acrylic resin our material					
(Perspex®)	0.107	2,730	0.056	1,430	3.22
Aluminum	0.249	6,320	0.123	3,130	17.06
Beryllium	0.508	12,900	0.350	8,880	23.5
Brass, naval	0.174	4,430	0.083	2,120	37.30
Cadmium	0.109	2,780	0.059	1,500	24.02
Columbium	0.194	4,920	0.083	2,100	42.16
Copper	0.183	4,660	0.089	2,260	41.61
Glycerine	0.076	1,920	-	-	2.42
Gold	0.128	3,240	0.047	1,200	62.60
Inconel®	0.229	5,820	0.119	3,020	49.47
Iron	0.232	5,900	0.127	3,230	45.43
Iron, cast (slow)	0.138	3,500	0.087	2,200	25.00
Iron, cast (fast)	0.220	5,600	0.126	3,220	40.00
Lead	0.085	2,160	0.028	700	24.49
Manganese	0.183	4,660	0.093	2,350	34.44
Mercury	0.057	1,450	-	-	19.66
Molybdenum	0.246	6,250	0.132	3,350	63.75
Motor Oil (SAE 20 or 30)	0.069	1,740	-	-	1.51
Nickel, pure	0.222	5,630	0.117	2,960	49.99
Platinum	0.156	3,960	0.066	1,670	84.74
Polyamide (nylon, Perlon®) (slow)	0.087	2,200	0.043	1,100	2.40
Polyamide (nylon, Perlon®) (fast)	0.102	2,600	0.047	1,200	3.10
Polystyrene	0.092	2,340	-	-	2.47
Polyvinylchloride, PVC, hard	0.094	2,395	0.042	1,060	3.35
Silver	0.142	3,600	0.063	1,590	37.76
Steel, 1020	0.232	5,890	0.128	3,240	45.63
Steel, 4340	0.230	5,850	0.128	3,240	45.63
Steel 302 austenitic stainless	0.223	5,660	0.123	3,120	45.45

Steel 347 austenitic stainless	0.226	5,740	0.122	3,090	45.40
Tin	0.131	3,320	0.066	1,670	24.20
Titanium, Ti 150A	0.240	6,100	0.123	3,120	27.69
Tungsten	0.204	5,180	0.113	2,870	99.72
Uranium	0.133	3,370	0.078	1,980	63.02
Water (20° C)	0.058	1,480	-	-	1.48
Zinc	0.164	4,170	0.095	2,410	29.61
Zirconium	0.183	4,650	0.089	2,250	30.13

Anexo 2. Cálculo de errores relativos para cada técnica

Técnica A

Derivando la ecuación del lado opuesto de la ranura (ec. 4.6) de la forma que indica la ecuación número 4.23, el error para esta técnica queda expresado de la siguiente manera:

$$\frac{dc}{dt} = 1 - \frac{t}{\sqrt{L_1^2 + t^2 - L_2^2}}$$

$$\frac{dc}{dL_1} = -\frac{L_1}{\sqrt{L_1^2 + t^2 - L_2^2}}$$

$$\frac{dc}{dL_2} = \frac{L_2}{\sqrt{L_1^2 + t^2 - L_2^2}}$$

donde el resultado final es

$$\Delta c = \sqrt{(\Delta t)^2 - \frac{2 * t * \Delta t^2}{\sqrt{L_1^2 - L_2^2 + t^2}}} + \left(\frac{(L_1 * \Delta L_1)^2 + (L_2 * \Delta L_2)^2 + (t * \Delta t)^2}{L_1^2 - L_2^2 + t^2} \right)$$

y obviando el término negativo para maximizar el error, queda finalmente

$$\Delta c = \sqrt{(\Delta t)^2 + \left(\frac{(L_1 * \Delta L_1)^2 + (L_2 * \Delta L_2)^2 + (t * \Delta t)^2}{L_1^2 - L_2^2 + t^2} \right)}$$

Técnica B

De la misma forma que el método anterior y aplicando también la ecuación 4.23, la fórmula para el lado opuesto de la ranura (ec. 4.9) queda de la siguiente manera:

$$\frac{dc}{dt} = 1$$

$$\frac{dc}{dL_1} = \frac{L_1 * (L_1^2 - L_2^2 - x^2)}{2 * L_2 * x^2 * \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}}}$$

$$\frac{dc}{dL_2} = -\frac{L_2 * \left(\frac{L_1^2 - L_2^2 - x^2}{L_2 * x^2} + \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{2 * L_2^3 * x^2} \right)}{2 * \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}}} - \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}}$$

$$\frac{dc}{dx} = -\frac{L_2 * \left(\frac{L_1^2 - L_2^2 - x^2}{L_2 * x} + \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{2 * L_2^2 * x^3} \right)}{2 * \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}}}$$

$$\Delta c = \sqrt{(\Delta l)^2 + \left(\frac{L_1 * (L_1^2 - L_2^2 - x^2)}{2 * L_2 * x^2 * \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}}} \right)^2 * (\Delta L_1)^2 + \left(\frac{L_2 * \left(\frac{L_1^2 - L_2^2 - x^2}{L_2 x^2} + \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{2 * L_2^3 * x^2} \right)}{2 * \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}}} - \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}} \right)^2 * (\Delta L_2)^2 +$$

$$\sqrt{\left(\frac{L_2 * \left(\frac{L_1^2 - L_2^2 - x^2}{L_2^2 x} + \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{2 * L_2^2 * x^3} \right)}{2 * \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}}} \right)^2 * (\Delta x)^2}$$

Para el lado de ranura (ec. 4.10) queda así:

$$\frac{dc}{dL_1} = - \frac{L_1 * (L_1^2 - L_2^2 - x^2)}{2 * L_2 * x^2 * \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}}}$$

$$\frac{dc}{dL_2} = \frac{L_2 * \left(\frac{L_1^2 - L_2^2 - x^2}{L_2 * x^2} + \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{2 * L_2^3 * x^2} \right)}{2 * \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}}} + \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}}$$

$$\frac{dc}{dx} = \frac{L_2 * \left(\frac{L_1^2 - L_2^2 - x^2}{L_2^2 * x} + \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{2 * L_2^2 * x^3} \right)}{2 * \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}}}$$

$$\Delta c = \sqrt{\left(- \frac{L_1 * (L_1^2 - L_2^2 - x^2)}{2 * L_2 * x^2 * \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}}} \right)^2 * (\Delta L_1)^2 + \left(\frac{L_2 * \left(\frac{L_1^2 - L_2^2 - x^2}{L_2 x^2} + \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{2 * L_2^3 * x^2} \right)}{2 * \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}}} + \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}} \right)^2 * (\Delta L_2)^2 +$$

$$\sqrt{\left(\frac{L_2 * \left(\frac{L_1^2 - L_2^2 - x^2}{L_2^2 x} + \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{2 * L_2^2 * x^3} \right)}{2 * \sqrt{1 - \frac{(L_1^2 - L_2^2 - x^2)^2}{4 * L_2^2 * x^2}}} \right)^2 * (\Delta x)^2}$$

Técnica C

Para este método, la fórmula para el lado opuesto de la ranura (ec. 4.11) queda de la siguiente manera:

$$\frac{dc}{dt} = 1$$
$$\frac{dc}{dl} = \frac{-l}{\sqrt{l^2 - (d/2)^2}}$$
$$\frac{dc}{dd} = \frac{0.25 * d}{\sqrt{l^2 - 0.25 * d^2}}$$

quedando la ecuación resumida de la siguiente forma:

$$\Delta c = \sqrt{(\Delta l)^2 + \frac{(l * \Delta l)^2}{l^2 - (d/2)^2} + \frac{(0.25 * d * \Delta d)^2}{l^2 - 0.25 * d^2}}$$

Para el lado de la ranura (ec. 4.12) queda así:

$$\frac{dc}{dl} = \frac{l}{\sqrt{l^2 - (d/2)^2}}$$
$$\frac{dc}{dd} = \frac{-0.25 * d}{\sqrt{l^2 - 0.25 * d^2}}$$

quedando la ecuación resumida de la siguiente forma:

$$\Delta c = \sqrt{\frac{(l * \Delta l)^2}{l^2 - (d/2)^2} + \frac{(0.25 * d * \Delta d)^2}{l^2 - 0.25 * d^2}}$$

Técnica D

Como en este caso se trabajan con ángulos, los cálculos son más tediosos por lo que se han resumido y únicamente se muestran los resultados más relevantes. De la ecuación 4.13 se desprende:

$$(\Delta \theta_1)^2 = \left(\left(\frac{(2 * d * \Delta d)^2 + (2 * L_1 * \Delta L_1)^2 + (2 * M_1 * \Delta M_1)^2}{(d^2 + L_1^2 - M_1^2)^2} \right) + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{\Delta L_1}{L_1} \right)^2 \right) * \left(\frac{\cos \theta_1}{\sin \theta_1} \right)^2$$

de la ecuación 4.14

$$(\Delta\theta_2)^2 = \left(\left(\frac{(2 * d * \Delta d)^2 + (2 * L_2 * \Delta L_2)^2 + (2 * M_2 * \Delta M_2)^2}{(d^2 + L_2^2 - M_2^2)^2} \right) + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{\Delta L_2}{L_2} \right)^2 \right) * \left(\frac{\cos \theta_2}{\sin \theta_2} \right)^2$$

y de la ecuación 4.15 se desprende el siguiente resultado

$$\Delta c = \frac{1}{2 * c} * \sqrt{(2 * L_1 * \Delta L_1)^2 + (2 * L_2 * \Delta L_2)^2 + \left(\left(\frac{\Delta L_1}{L_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta L_2}{L_2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta(\theta_2 - \theta_1) * \sin(\theta_2 - \theta_1)}{\cos(\theta_2 - \theta_1)} \right)^2 \right) * (2 * L_1 * L_2 * \cos(\theta_2 - \theta_1))^2}$$

Para el tratamiento del error en la ecuación 4.16, resumimos de la siguiente forma

$$(\Delta(\alpha - \theta_2))^2 = \left(\left(\Delta(\theta_2 - \theta_1) * \frac{\cos(\theta_2 - \theta_1)}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c} \right)^2 + \left(\frac{\Delta L_1}{L_1} \right)^2 \right) * \tan^2(\alpha - \theta_2)$$

dando como resultado

$$\Delta\alpha = \sqrt{(\Delta(\alpha - \theta_2))^2 + (\Delta\theta_2)^2}$$

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
CENTRO DE INFORMACION C A C