



Ultrasonido Industrial

Manual del Curso de Ultrasonido

Nivel II

02-02-02-MANUAL-UT-Nivel II

Elaborado por: Ing. Diego Enrique Gamarra Azacon
ASNT Nivel III UT
Primera Edición. Marzo 2021
Segunda Edición. Septiembre 2021





INDICE

Capítulo 1: Introducción al Ultrasonido	6
1. Definiciones y conceptos de ultrasonido	6
2. Aplicaciones.....	Error! Bookmark not defined.
3. Introducción a la inspección Ultrasónica	6
4. Ventajas y Limitaciones	8
Capítulo 2: Principios Físicos para Ultrasonido	9
1. Naturaleza de las ondas sonoras	9
2. Propiedades de una onda	10
2.1 Velocidad de la Onda	10
2.2 Frecuencia, Amplitud y Longitud de Onda	11
3. Medio de propagación	13
4. Modos de generación de la onda sonora	14
4.1 Transductores Ultrasónicos – Principio Piezoeléctrico.	14
4.2 Tipos de Ondas.....	16
4.2.1 Ondas Longitudinales	16
4.2.2 Ondas Transversales	17
4.2.3 Ondas Superficiales.....	18
5. Impedancia Acústica	18
6. Atenuación de las Onda Ultrasónica	19
7. Reflexión.....	20
7.1 Principios de Reflexión	21
8. Refracción, ley de Snell y conversión de modo	24
9. Ángulos críticos.....	26
8. Haz Ultrasónico y Zonas de Fresnel y Fraunhofer	28



12.1	Zona Fresnel – Campo Cercano	28
12.2	Zona Fraunhofer – Campo Lejano	30
12.3	Divergencia del Haz Ultrasónico	31
12.4	Focalización en el Haz Ultrasónico	33
Capítulo 3: Equipo de Inspección.....		35
1.	Tipos de Equipos de Ultrasonido	
2.	Componentes del sistema ultrasónico	
1.1	Fuente de Alimentación	Error! Bookmark not defined.
1.2	Reloj.....	Error! Bookmark not defined.
1.2.1	Cero Eléctrico, Cero Acústico y Zona Muerta ..	Error! Bookmark not defined.
1.3	Timebase	Error! Bookmark not defined.
1.3.1	Controles del Timebase.....	Error! Bookmark not defined.
1.4	Generador	Error! Bookmark not defined.
1.5	Receptor/ Amplificador	Error! Bookmark not defined.
1.5.1	Receptor	Error! Bookmark not defined.
1.5.2	Amplificador	Error! Bookmark not defined.
1.6	Pantalla y Compuertas	Error! Bookmark not defined.
1.6.1	Imagen Tipo A	39
1.6.2	Imagen Tipo B.....	39
1.6.3	Imagen Tipo C	40
3.	Transductores.....	
3.1	Cristal Piezoeléctrico	Error! Bookmark not defined.
3.2	Placa Protectora	Error! Bookmark not defined.
3.3.	Material de Respaldo	Error! Bookmark not defined.
1.4	Selección del Transductor.....	47
1.5	Construcción, materiales y formas de transductores	Error! Bookmark not defined.
1.6	Tipos de transductores.....	
1.6.1	Transductores de Haz Recto.....	
1.6.1.1	Transductores de Haz Recto con Línea de Retardo.....	



1.6.2	Transductores de Haz Angular	43
1.6.3	Transductores duales	44
1.6.4	Transductores de inmersión	45
1.7	Cables y conexiones	49
4.	Acoplante.....	50
4.1	Selección del Acoplante	Error! Bookmark not defined.
4.2	Acoplante de Contacto y de Inmersión	Error! Bookmark not defined.
4.3	Reflexión y Atenuación por el Acoplante.....	Error! Bookmark not defined.
Capítulo 4: Calibración y Bloques de Calibración		53
1	Calibración.....	53
1.	Parámetros generales a considerar en la estandarización	54
1.1	Velocidad	54
1.2	Sensibilidad	54
1.3	Resolución.....	54
1.4	Linealidad Horizontal	55
1.5	Linealidad Vertical.....	55
1.6	Señal relación-ruido	55
2.	Bloques de Calibración	56
2.1	Reflectores	57
2.2	Bloques de Calibración.....	58
2.2.1	Bloques de Múltiples Pasos.	58
2.2.2	Bloques de Distancia/Área Amplitud y Navships	59
2.2.3	Bloque IIW.....	60
Capítulo 5: Métodos de Inspección		Error! Bookmark not defined.
1.	Variables básicas para la inspección.....	Error! Bookmark not defined.
1.1	Detectabilidad	Error! Bookmark not defined.
1.2	Penetración.....	Error! Bookmark not defined.
1.3	Sensibilidad	Error! Bookmark not defined.
2.	Métodos de Inspección	Error! Bookmark not defined.
1.1	Contacto.....	Error! Bookmark not defined.



✓ Haz Recto.....	Error! Bookmark not defined.
✓ Haz Angular	Error! Bookmark not defined.
✓ Inspección con transductor dual	Error! Bookmark not defined.
✓ Inspección con transductor con línea de retardo ...	Error! Bookmark not defined.
1.2 Inmersión	Error! Bookmark not defined.
2. Comparación entre el método de contacto y el método de inmersión.....	Error! Bookmark not defined.
Capítulo 6: Evaluación de discontinuidades	64
1. Métodos de Evaluación	64
1.1 Comparación con reflectores de referencia	64
1.1.1 Curva de Distancia Amplitud, curva DAC	65
1.1.2 Técnica de la caída de los 6dB	66
1.2 Método de evaluación por caída de amplitud	68
Capítulo 8: Vida Remanente y Fallas de Materiales	Error! Bookmark not defined.
1. Causas de Fallas en Materiales.....	Error! Bookmark not defined.
Capítulo 9: Procesos de Fabricación y Fallas Asociadas.....	Error! Bookmark not defined.
1. Proceso de Laminación.....	Error! Bookmark not defined.
2. Proceso de Fundición	Error! Bookmark not defined.
3. Proceso de Forja.....	Error! Bookmark not defined.
4. Proceso de Soldadura	Error! Bookmark not defined.
Capítulo 10: Inspección de Componentes.....	Error! Bookmark not defined.
1. Inspección de piezas vaciadas	Error! Bookmark not defined.
2. Inspección de piezas forjadas	Error! Bookmark not defined.
3. Inspección de laminaciones.....	Error! Bookmark not defined.
4. Inspección de Brazed y Bonded Joints.....	Error! Bookmark not defined.

Capítulo 1: Introducción al Ultrasonido

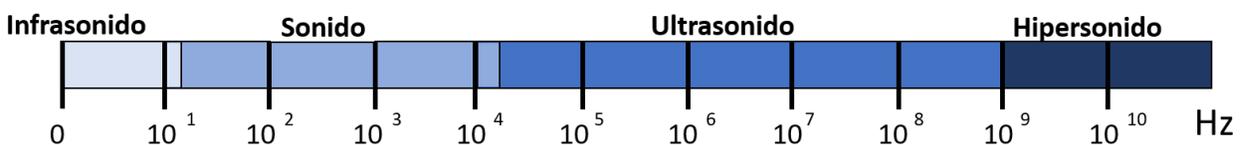
1. Definiciones y conceptos de ultrasonido

El ultrasonido en el campo industrial se puede calificar como una de las técnicas que se implementan para la detección de discontinuidades en los materiales y medición de espesores.

Ahora bien, para definir el ultrasonido hay que hablar acerca del sonido. El sonido básicamente es una propagación de energía mecánica a través de un medio que puede ser sólido, líquido o gaseoso. La vibración de las ondas sonoras ocurre en un rango de frecuencia de 16 a 20.000 Hz.

El ser humano solo es capaz de percibir frecuencias superiores a 20 Hz e inferiores a 20.000Hz. En la siguiente figura podemos ver la clasificación de las ondas sonoras en función de la frecuencia.

Figura 1.1 Clasificación de las ondas sonoras según la frecuencia.



El ultrasonido se caracteriza por tener una frecuencia mayor a 20.000 Hz. Al igual que el sonido, el ultrasonido requiere de un medio físico para poder propagarse y por lo tanto no podrá propagarse en el vacío.

La ventaja primordial que ofrece el ultrasonido es que a frecuencias mayores a 100 kHz la onda forma un haz ultrasónico que puede utilizarse para evaluar los materiales ya que el haz sigue las reglas físicas de la óptica.

2. Introducción a la inspección Ultrasónica

La inspección ultrasónica se basa en la propagación de una onda ultrasónica a través del volumen del material. En el caso de una chapa metálica podríamos decir que el haz ultrasónico viajara hasta la pared posterior e impactara con dicha superficie. Dicha superficie generará un eco que regresará al equipo y será interpretado como una indicación, tal y como se aprecia en la siguiente figura:



En el caso de la figura el haz ultrasónico impacta con la pared posterior. Pero podría ocurrir que dentro del volumen de la chapa tenemos una discontinuidad, dicha discontinuidad también podría generar un eco que sería observado como una indicación en la pantalla de nuestro equipo de inspección.

Ahora bien, tener una indicación en la pantalla realmente no nos sirve de mucho al menos de que podamos sustraerle información y evidentemente en los ensayos no destructivos eso es lo que buscamos. Haciendo base en el ejemplo de la figura anterior podríamos medir el espesor de esa chapa conociendo los siguientes valores:

1. Velocidad de propagación de la onda ultrasónica en el material.
2. El tiempo que demora la onda en hacer el recorrido desde el momento que entra en el material hasta que sale.

Basándonos en estos dos valores fácilmente se puede determinar el espesor de una chapa metálica. A continuación, se presentará el cálculo:

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{Distancia}}{\text{Tiempo}}$$

Hay que recordar que la onda ultrasónica recorre dos veces la distancia debido a que bajo hasta impactar la pared posterior y luego el eco recorrió nuevamente la distancia para regresar al equipo. Por lo tanto, la fórmula quedaría:

$$\text{Velocidad} = \frac{2 * \text{Distancia}}{\text{Tiempo}}$$

Resultando en,

$$\text{Espesor} = \frac{\text{Velocidad} * \text{Tiempo}}{2}$$

Aquí obtenemos una fórmula de cálculo para medir los espesores de piezas basándonos en el método de ultrasonido.

Pero es importante mencionar que aquí estamos considerando condiciones ideales y el caso más básico de ultrasonido que podríamos encontrar.

3. Ventajas y Limitaciones

Tal y como se mencionó en el apartado de las aplicaciones dependiendo del tipo de la técnica de ultrasonido las ventajas y limitaciones variaran, pero de manera general se pueden listar las ventajas y limitaciones generales. En la siguiente tabla se presentan las ventajas y limitaciones de la técnica.

Tabla 3.1. Ventajas y Limitaciones de la Técnica de Ultrasonido.

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Permite la inspección de grandes espesores debido al buen poder de penetración. • Alta sensibilidad para la detección de discontinuidades pequeñas. • La interpretación de resultados es inmediata. • Equipos portátiles. • No existen riesgos para la operación del equipo. • Capacidad de almacenar la información de la inspección. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requieren técnicos experimentados para que la inspección ofrezca resultados confiables. • Dificultad de inspección cuando la superficie es rugosa o irregular. • Es necesario el uso de un material acoplante. • Es necesario el uso de patrones de calibración.

Capítulo 2: Principios Físicos para Ultrasonido

1. Naturaleza de las ondas sonoras

Como ya se abarcó en el Capítulo 1 sabemos que el sonido es una propagación de energía mecánica a través de un medio. Pero, ¿la propagación y el movimiento en el medio a que se deben?

La naturaleza del sonido se puede explicar a través de la capacidad auditiva del ser humano. Toda onda audible es resultado de la vibración de una fuente sonora y el desplazamiento hasta nuestro pabellón auricular en donde las vibraciones son asimiladas por nuestro sistema auricular.

Sin las vibraciones no se podría oír absolutamente nada. Y es por ello que las vibraciones caracterizan las ondas. Un ejemplo sencillo se aprecia en una guitarra acústica, cada cuerda de la guitarra tiene tonos diferentes, pero esto se explica porque cada cuerda vibra a frecuencias diferentes.

Entonces el sonido se genera por una perturbación producida por presión que produce las vibraciones mecánicas.

Ahora bien, las vibraciones mecánicas se caracterizan por tener movimientos ondulatorios. Dicho movimiento se propaga a través de las partículas del medio y es por ello que la existencia de un medio es fundamental para la propagación de las ondas. Ya que la energía se propaga de una partícula a la próxima para poder desplazarse.

Ese movimiento se realiza debido a que las partículas salen de su estado de equilibrio, el hecho de que la partícula salga de su estado de equilibrio genera esfuerzos internos que básicamente son energía cinética que se tiene acumulada.

Cuando la partícula sale del equilibrio genera compresiones y rarefacciones que básicamente se comportan como un resorte entre las partículas y esto produce dos cosas. La primera sería que el material vuelva a su posición original y por otra parte permite el movimiento de las ondas.

De manera ilustrativa el movimiento de las ondas sonoras se puede apreciar cuando una piedra cae en agua. En la siguiente figura se aprecia el movimiento ondulatorio.



Tal y como se aprecia en la figura anterior las ondas se mueven a través del medio que en este caso es un medio líquido. Lo mismo sucede en el aire para el sonido y en nuestro caso, para la inspección ultrasónica, lo mismo ocurre en los sólidos.

En la figura anterior se tiene una representación de dos dimensiones, pero evidentemente la onda que se genera por una fuente se propagara en todas las direcciones desde su punto de origen.

2. Propiedades de una onda

2.1 Velocidad de la Onda

La velocidad es la distancia recorrida por una unidad de tiempo. La velocidad se puede expresar en diversas unidades, pero para los sistemas ultrasónicos y para disminuir los cálculos matemáticos se suele utilizar la unidad de kilómetros por segundo [km/s], también se suele utilizar la unidad de centímetros por microsegundos [cm/ μ s].

La velocidad de la onda depende de varios factores, pero de manera general son:

- a. Densidad del material
- b. Elasticidad del material
- c. Modo de la onda
- d. Temperatura del material

A partir de los puntos a y b podemos decir que la velocidad de la onda variara dependiendo del material por el cual se propague. La velocidad de la onda será constante siempre y cuando el material sea homogéneo. Este punto será detallado en el punto 3 de este capítulo.



Del punto c podemos establecer que el modo de la onda afectara la velocidad con la que esta se desplaza. Este punto será detallado en el punto 5 de este capítulo.

Del punto d podemos decir que el cambio de temperatura afectara la velocidad de propagación. Este punto será detallado en el punto 4 de este capítulo.

La velocidad de la onda puede ser calculada en función del material seleccionado. Pero evidentemente ese sería un cálculo teórico que podrá diferir de la realidad, ese valor se puede obtener haciendo uso del equipo ultrasónico en campo.

A continuación, se aprecia una tabla con valores de velocidades para diversos materiales.

Material	VL (m/s)	VT (m/s)	Z	ρ (g/cm ³)
Acero	5900	3230	45	7.63
Aluminio	6320	3130	17	2.70
Plexyglass	2730	1430	3.2	1.17
Agua	1483	-	1.5	1.00
Quarzo	5800	2200	15.2	2.62

Tal y como se aprecia las velocidades varían en función del material y en función del tipo de onda. Es evidente que la densidad y la elasticidad tendrán un efecto claro en la velocidad de propagación.

Conocer la velocidad del material es **crucial** para que la inspección ultrasónica sea llevada a cabo correctamente. Esto se debe a que la velocidad de la onda permitirá al equipo calcular la distancia que recorre la onda y por lo tanto dar los resultados.

En caso de que la velocidad utilizada no sea correcta los resultados no serán correctos. Es por ello que es muy importante saber el peso que posee la velocidad de propagación para el correcto desempeño del método ultrasónico.

2.2 Frecuencia, Amplitud y Longitud de Onda

Para definir ciertos parámetros de la onda es mejor hacerlo haciendo uso de una ilustración. A continuación, se presenta la figura de una onda.

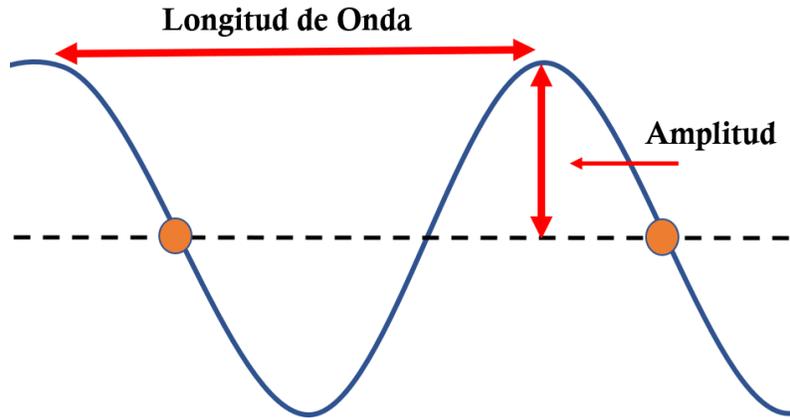


Figura 2.2.1 Onda y características.

Ciclo: El ciclo se refiere al movimiento completo de la onda. En la Figura 2.2.1 se puede definir como el movimiento que tiene que seguir el punto naranja de la izquierda hasta el punto naranja de la derecha.

Longitud de Onda: Es la longitud de un ciclo. Se puede decir que es la distancia entre los picos, tal y como se aprecia en la Figura 2.2.1. La longitud de onda se representa con el símbolo lambda (λ). La distancia entre pico a pico también se puede definir como una compresión y una rarefacción. Conocer la longitud de onda es muy importante ya que el tamaño de discontinuidad más pequeña será la mitad de una longitud de onda, es decir $\lambda/2$.

$$\lambda = \frac{v}{F}$$

λ = Longitud de Onda

v = Velocidad

F = Frecuencia

Amplitud: Define el tamaño de la onda. Se mide desde el eje central de la onda hasta el pico de la onda, tal y como se aprecia en la Figura 2.2.1.

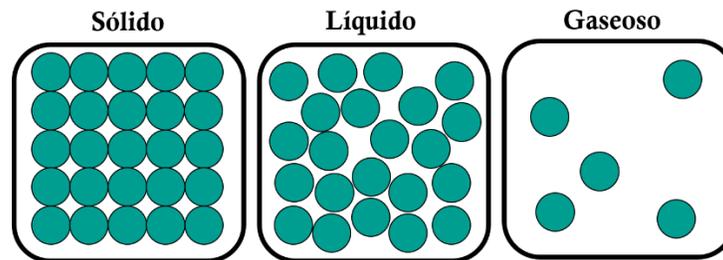
Frecuencia: La Frecuencia de una onda es el número de veces que una onda cumple un ciclo en una determinada cantidad de tiempo, generalmente representado por segundo. La frecuencia se mide en Hertz (Hz), en donde 1 Hz representa 1 ciclo por segundo.

La frecuencia es un valor muy importante ya que afectara directamente la penetración en el material. A medida que la frecuencia es más alta la penetración será menor pero la capacidad de detección mejorará ya que la longitud de onda será más pequeña.

A medida que la frecuencia es más baja la capacidad de detección disminuye, pero la penetración aumenta.

3. Medio de propagación

El medio de propagación no es una característica de la onda, pero es un componente fundamental para la propagación de la misma. En la siguiente figura se aprecian los tres estados de la materia en los cuales el sonido puede moverse.



En la figura anterior se observan las diferencias entre los estados de la materia. Se observa la presencia de las partículas que conforman el material y se aprecia que los materiales sólidos son más densos que los líquidos y estos a su vez son más densos que los gases.

La necesidad de un medio para la propagación es vital ya que sin materia no se podrá dar el efecto de la vibración. Se requieren dos propiedades básicas para poder generar el fenómeno de vibración.

- i. Masa/Densidad: Esto garantiza que habrá materia que se puede mover.
- ii. Elasticidad: La elasticidad es crucial para que el cuerpo de propagación pueda volver a su posición original, como un resorte.

Si estas dos propiedades existen el sonido podrá propagarse. Evidentemente los tres estados de la materia permiten la propagación ya que poseen dichas propiedades, pero en diferentes porcentajes y por lo tanto la propagación será diferente.

Para el sonido es más fácil propagarse en sólidos y líquidos ya que las partículas se encuentran más próximas. En cambio, la propagación en los gases es más difícil debido a que las partículas se encuentran más distantes.

Esta facilidad de propagación se refleja en la velocidad de propagación. Por lo tanto, el sonido viajara más rápido en sólidos que en líquidos y viajara más rápido en líquidos que en gases.

También hay que tomar en cuenta que el tamaño de las partículas también afectara la propagación ya que si las moléculas son más grandes requerirá más energía cinética para

poder moverse que lo que se requeriría para moléculas más pequeñas. Un ejemplo claro se aprecia al comparar las velocidades de propagación de una onda en aluminio y oro que poseen prácticamente la misma elasticidad. En el aluminio la onda se mueve dos veces más rápido que en el oro ya que la densidad es un 15% que la del oro.

Según lo comentado anteriormente podemos establecer que:

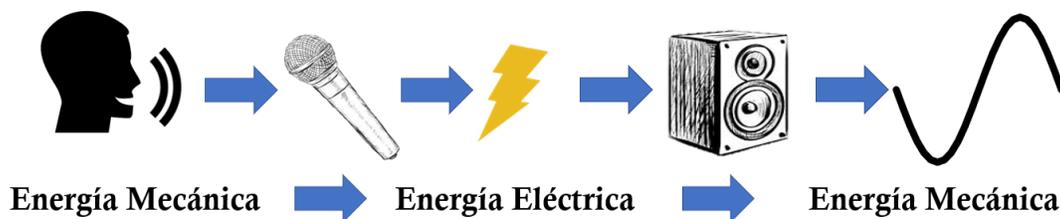
- El sonido no puede propagarse en el vacío.
- La propagación del sonido es a través de las partículas.
- La velocidad de propagación depende del material (densidad y elasticidad).

4. Modos de generación de la onda sonora

Como ya se ha mencionado, la vibración de las partículas, del medio, producen la onda.

Ahora bien, la manera mediante la cual se genera el sonido es a través de transductores. Un transductor es un componente que transforma un tipo de energía a otro.

Un ejemplo de uso cotidiano sería los micrófonos y las cornetas. Un micrófono convierte energía mecánica en energía eléctrica y la corneta convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Este ejemplo lo podemos ver sintetizado en la siguiente figura:



Ahora bien, en el método de ultrasonido el término transductor se aplica directamente a los componentes implementados para ejecutar la inspección ultrasónica. El transductor también es conocido como palpador.

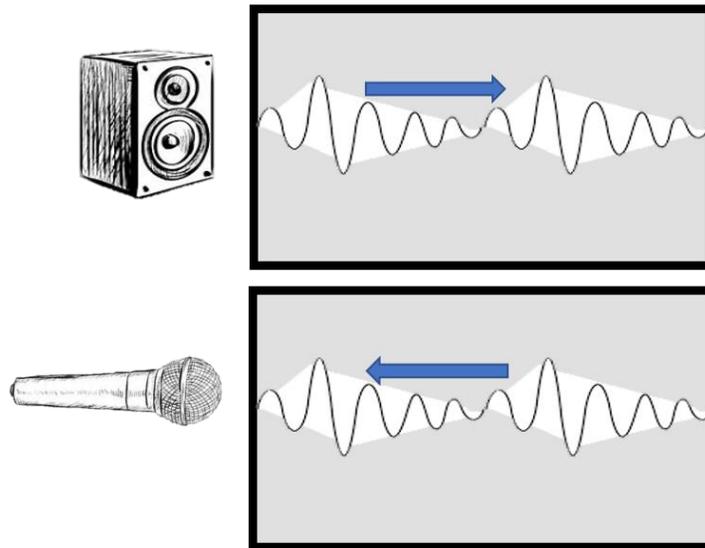
4.1 Transductores Ultrasónicos – Principio Piezoeléctrico.

Para la inspección ultrasónica se utiliza un transductor especializado para la generación de la onda ultrasónica.

El transductor es la herramienta que comunica al equipo de inspección con la pieza a evaluar y por lo tanto la medula espinal del sistema. Sin el transductor el sistema no funciona.

La inspección ultrasónica se basa en la emisión de la onda ultrasónica, generada por el transductor, la cual viaja a través del material para identificar posibles discontinuidades. Dadas las circunstancias adecuadas, el recorrido generara ecos y dichos ecos viajara nuevamente al transductor para ser convertida en energía eléctrica que luego será procesada por el equipo de inspección y colocada como una indicación en la pantalla del equipo.

En la siguiente figura se muestra un esquema de como ocurre el fenómeno.



Inspección Ultrasónica con una corneta y un micrófono.

Tal y como se aprecia en la figura anterior se genera un sonido con una corneta, la cual ingresa en el material y luego el eco producido es “escuchado” por el micrófono.

El transductor ultrasónico junta las dos partes de la figura anterior en un solo componente a través del uso de un cristal piezoeléctrico. Dicho cristal tiene la capacidad de convertir una incidencia mecánica en una respuesta eléctrica y viceversa. La relación de un transductor ultrasónico con la figura anterior se puede resumir en los dos puntos siguientes:

- Funciona como una corneta cuando convierte el voltaje en vibraciones.
- Funciona como un micrófono cuando convierte las vibraciones en voltaje.

El funcionamiento del transductor ultrasónico será detallado más adelante en este manual. Pero se introdujeron los conceptos para tener una base del origen de las ondas ultrasónicas.

Dependiendo de la manera en que se utilice el transductor ultrasónico la forma y el tipo de la onda sonora variara. Los tipos de onda serán abarcados en el siguiente punto.

4.2 Tipos de Ondas

Dependiendo de la manera que se genere la onda se pueden producir varios tipos de onda, como:

- Onda Longitudinales o de compresión.
- Onda Transversal o de corte.
- Onda Superficiales o Rayleigh.
- Onda de Placa o Lamb.

Los diferentes tipos de onda se definen por la relación que existe entre la dirección de la vibración de las partículas con respecto al sentido de propagación de la onda.

4.2.1 Ondas Longitudinales

Este tipo de ondas son las más fáciles de producir y poseen las velocidades más altas debido a la forma de vibración de las partículas. Dicha vibración es paralela a la dirección de propagación de la onda ultrasónica. Para la propagación de las ondas longitudinales es necesario que el material tenga elasticidad.

La elasticidad es una propiedad de los equipos sólidos, líquidos y gases. Por lo tanto, las ondas longitudinales se pueden propagar en cualquiera de estos tres medios.

Este tipo de ondas se puede apreciar fácilmente en un resorte. Si el resorte se estira y luego de suelta se apreciará como ocurren rarefacciones y compresiones a lo largo de toda su extensión. En la siguiente figura se aprecia una onda longitudinal que se puede relacionar al movimiento del resorte.

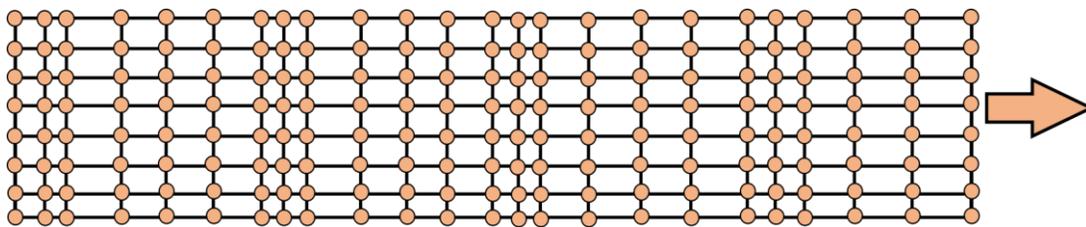


Figura 2.3.2 Onda Longitudinal.

En la Figura 2.3.2 se aprecia como las partículas se desplazan en el mismo sentido que la propagación y a pesar de que la Figura 2.3.2 sea una imagen estática se aprecia como las partículas generación una compresión y una dilatación a lo largo del recorrido. La distancia existente entre dos puntos sucesivos de compresión o dilatación corresponde a la longitud de onda.

Las ondas longitudinales son el único tipo de onda que tiene la capacidad de propagarse en sólidos, líquidos y gaseosos. Normalmente se denota la velocidad de esta onda con V_L . De manera general, la velocidad de una onda longitudinal es el doble que la velocidad de una onda transversal cuando se comparan en el mismo material.

V_L se define mediante la siguiente ecuación:

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

Debido a que las partículas y el movimiento de la onda son paralelas permite que el movimiento total de ambas se una y esto genera que este tipo de onda es el más rápido de todos los modos de ondas.

4.2.2 Ondas Transversales

En este tipo de ondas la vibración de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda ultrasónica. Para la propagación de las ondas transversales es necesario que el material tenga elasticidad y rigidez. La rigidez es una propiedad que solo poseen los materiales sólidos.

Por lo tanto, las ondas transversales solo se pueden propagar en un medio sólido.

En la siguiente figura se aprecia una onda de corte.

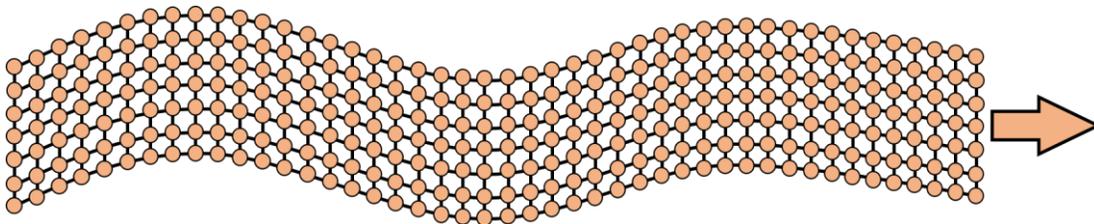


Figura 2.3.1 Onda de Corte.

Tal y como se aprecia en la Figura 2.3.1 la onda se mueve en la dirección de la flecha, pero las partículas suben y bajan, alcanzando máximos y mínimos. La distancia entre dos puntos sucesivos, máximos o mínimos, corresponde a la longitud de onda.



Este tipo de Ondas solo se puede propagar en materiales sólidos. La velocidad de propagación de estas ondas se le conoce como V_T . La velocidad de una onda transversal se define mediante la siguiente ecuación:

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

En donde,

E = Modulo de Young. G = Modulo de Corte

μ = Coeficiente de Poisson. ρ = Densidad del Material

Es evidente que la velocidad de la onda queda definida por el material por la que este se propague.

4.2.3 Ondas Superficiales

El movimiento vibratorio de las partículas en una onda superficial sigue un movimiento elíptico. Se llama onda superficial porque el movimiento se desenvuelve en la superficie del material por el que se desplaza, y las partículas que se ven incluidas en el movimiento tienen una profundidad de hasta una longitud de onda, por debajo de esta profundidad las partículas se encuentran en reposo.

La velocidad de este tipo de ondas es aproximadamente un 90% la velocidad de la onda transversal. La velocidad de la onda superficial se puede denotar con V_R .

Las ondas superficiales requieren que el medio de propagación tenga rigidez. Por lo tanto, solo se pueden propagar en un medio sólido.

Las ondas ultrasónicas de este tipo serán muy sensibles a discontinuidades en la superficie. Debido a la alta sensibilidad que poseen es muy importante que se sea muy cuidadoso en su implementación ya que su uso es susceptible a generar indicaciones por cualquier suciedad, resto de soldadura, entre otras cosas. Así que es muy importante la limpieza para la utilización de esta onda a la hora de una inspección.

5. Impedancia Acústica

Una característica de los materiales es que todos poseen impedancia Acústica (Z).

La impedancia acústica es la oposición que ofrecen las partículas de manera individual a una onda sonora que viaja a través de estas. La impedancia acústica será dependiente del material ya que depende de las partículas que ofrecen la oposición, el cálculo de la impedancia se puede realizar haciendo uso de la siguiente formula.

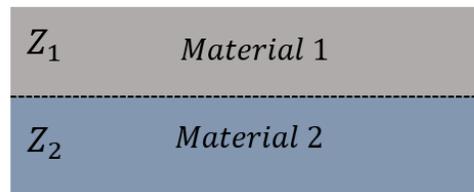
$$Z = \rho V$$

Z = Impedancia Acústica

ρ = Densidad del Material

V = Velocidad de la onda

Las variaciones con respecto a las propiedades acústicas entre materiales generan una interfaz acústica que se evidencia en la siguiente imagen:



La línea punteada representa la interfaz acústica que separa dos materiales (o zonas) con impedancias acústicas diferente.

Esta interfaz acústica representara un fenómeno para el haz ultrasónico que lo atraviese ya que dadas las circunstancias se pueden generar diversos fenómenos al pasar a través de esta zona. Algunos de los fenómenos son: Reflexión, Refracción, Conversión de Modo y Difracción del Haz Ultrasónico.

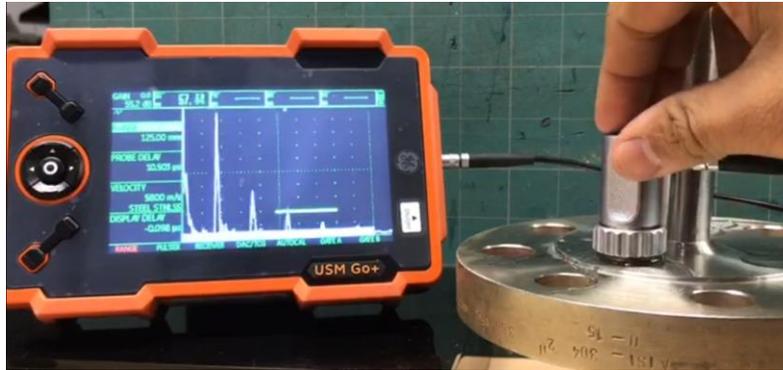
El ángulo de incidencia sobre la interfaz acústica es un factor clave para determinar que fenómenos pueden ocurrir.

Cada uno de estos fenómenos será explicado más adelante.

6. Atenuación de las Onda Ultrasónica

Atenuación se define como la disminución de la intensidad. En el caso del ultrasonido hablaremos de la disminución de la energía con la que la onda ultrasónica regresa al equipo de inspección luego de su recorrido.

Si evaluamos la siguiente imagen veremos la pantalla de un equipo de ultrasonido con una señal clara y definida, el eje vertical reflejara la amplitud de dicha indicación y por lo tanto la energía que esa señal tiene.



Ciertamente la imagen que se genera tiene un pico claro y luego tiene picos que poco a poco van disminuyendo su amplitud a lo largo de la pantalla.

La amplitud en la pantalla hace referencia a la energía con la que la onda ultrasónica llega al equipo.

Si queremos explicarlo con un ejemplo cotidiano podríamos pensar que estamos en una montaña y si gritamos al vacío escucharemos un eco generado por ese grito inicial pero mucho más suave.

Ahora bien, el motivo por el cual el equipo detecta dichos ecos es debido a que el haz ultrasónico a pesar de haber regresado al transductor luego del primer recorrido no significa que haya desaparecido. El ultrasonido continuará su recorrido hasta que la energía que tenga se disipe completamente y esto significa que seguirá generando señales en la pantalla del equipo. Es por ello que vemos repeticiones del primer pico.

A la hora de realizar un análisis de los resultados de ultrasonido el inspector tiene que tener la formación adecuada para saber identificar la señal correcta de los ecos.

Existen diversos mecanismos mediante los cuales la onda ultrasónica puede atenuarse. Y estos son:

- Acoplante
- Divergencia del Haz Ultrasónico.
- Dispersión del Medio.
- Absorción del Medio.

7. Reflexión

Cuando una onda sonora encuentra un cambio acústico, en el material por el cual se propaga, la onda se refleja parcialmente. Ese cambio entre materiales se presenta en la interfaz acústica en donde dos materiales con dos impedancias acústicas se encuentran.

La cantidad reflejada dependerá del ángulo de incidencia y de las propiedades acústicas de los dos materiales.

Ahora bien, sabiendo el valor de la impedancia acústica, podemos evaluar la relación de energía sonora transmitida y reflejada entre dos cuerpos. Esa relación nos permite saber cuánta energía se reflejó en la interfaz de los materiales y cuánta energía paso al segundo material. A continuación, presentamos una figura para que sea más fácil explicar las ecuaciones.

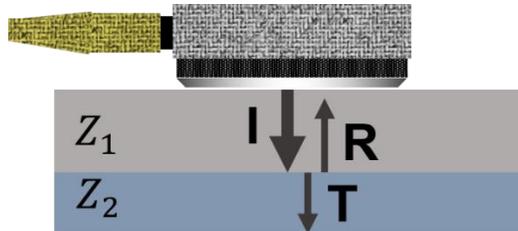


Figura 2.5.1 Fenómeno de Reflexión.

Tal y como se aprecia en la figura 2.5.1 vemos que la onda incidente (I) llega hasta la interfaz acústica y se genera una onda transmitida (T) y una onda reflejada (R). Los porcentajes de energía sonora que cada onda tendrán se pueden calcular haciendo uso de las siguientes ecuaciones.

Tenemos que:

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad ; \quad R + T = 1$$

En donde,

R = Coeficiente de energía reflejada.

Z_1 = Z del material 1.

T = Coeficiente de energía transmitida.

Z_2 = Z del material 2.

Del principio de reflexión podemos establecer que:

- ✓ A medida que la diferencia acústica sea mayor entre los materiales 1 y 2, el porcentaje de reflexión será mayor.
- ✓ La energía reflejada sumada con la energía transmitida dará un valor de 1. Representando el 100%.

7.1 Principios de Reflexión

Como ya fue establecido se puede calcular el porcentaje de energía que se refleja. Ahora bien, ese cálculo es teórico y aplica en condiciones ideales. Ya que el cálculo está elaborado para que la superficie reflectante sea ideal.

Existen ciertos factores que pueden afectar la capacidad de reflexión de la interfaz. Los factores principales son el tamaño, la forma, la orientación y la textura de esa interfaz acústica. En la siguiente figura se aprecian cada uno de estos factores.

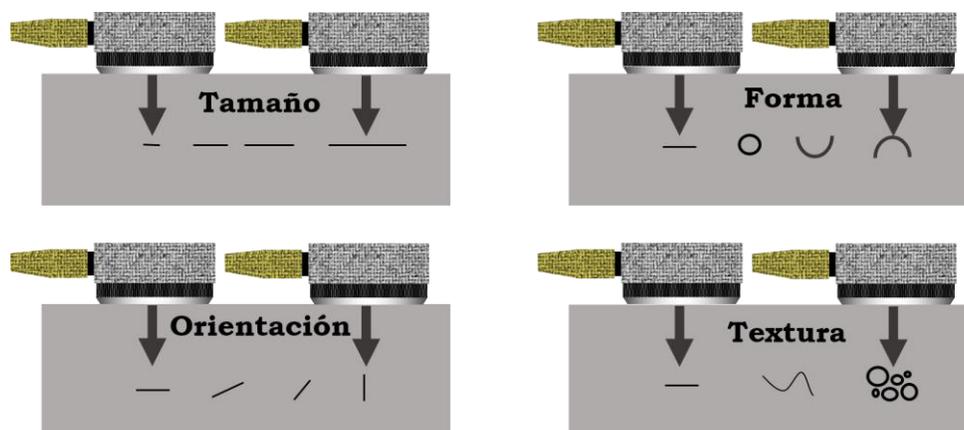


Figura 8.1.1 Fenómeno de Reflexión.

Tamaño:

El tamaño del reflector es muy importante ya que si el reflector es muy pequeño solo una pequeña porción del haz ultrasónico chocará y por lo tanto poca energía sonora será reflejada. A medida que el tamaño del reflector aumenta se tendrá mayor amplitud en la recepción.

Forma:

La forma del reflecto es crucial ya que la superficie de impacto hará que la reflexión de la onda sonora se esparza en múltiples direcciones y por lo tanto no será una única reflexión. Por lo tanto, desde el punto de vista de inspección ultrasónica la forma que más energía sonora refleja sería una superficie plana ya que toda la reflexión será en la misma dirección. En la siguiente figura se aprecia dicho fenómeno.

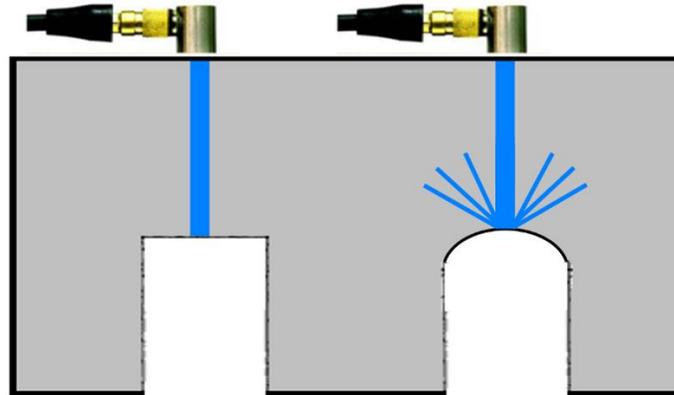


Figura 8.1.2 Efecto de la forma del reflector en la reflexión.

Tal y como se aprecia en la figura 8.1.2, podemos ver que en el caso de reflector con superficie plana la reflexión de la onda será por el mismo camino que recorrió la onda incidente. En el caso del reflector que posee una superficie circular se aprecia como la reflexión de la onda se esparce en múltiples direcciones, generando que solo un pequeño porcentaje de la reflexión total regrese por el recorrido de incidencia.

Orientación:

La orientación de la superficie también es fundamental para la reflexión. El ángulo de incidencia va a influir en el ángulo de la reflexión. Si el haz ultrasónico es perpendicular a la superficie la reflexión será por el recorrido de la onda sonora, pero en el caso de que exista un ángulo de incidencia se tendrá un ángulo de reflexión. En la siguiente figura podemos apreciar este fenómeno.

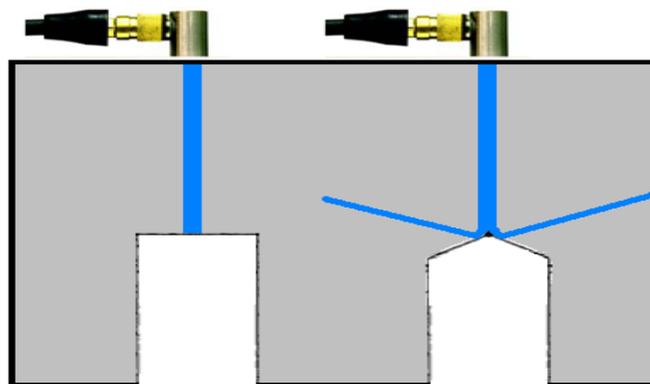


Figura 8.1.3 Efecto de la orientación del reflector en la reflexión.



Tal y como se aprecia en la figura 8.1.3 la incidencia en una superficie perpendicular evidencia que la reflexión tendrá una mayor amplitud ya que se reflejará en la misma dirección que la recorrida por la onda incidente. Al evaluar el reflector que tiene un ángulo de incidencia se aprecia claramente que la reflexión del haz ultrasónico tiene un ángulo de reflexión.

Textura:

La textura de la indicación hace referencia al acabado superficial del reflector. A medida que el acabado superficial es mejor se tendrá mejor reflexión.

Si lo evaluamos desde el punto de vista de defectos podemos evaluar una grieta plana y un grupo de porosidades. Una grieta plana tendrá mejor reflexión a diferencia de un grupo de poros que su reflexión se verá disminuida por la textura de la indicación.

8 Refracción, ley de Snell y conversión de modo

Cuando la onda sonora incide la interfaz de los materiales en un ángulo diferente a uno perpendicular ocurren los siguientes fenómenos:

1. Refracción
2. Transmisión
3. Reflexión
4. Conversión de Modo

La refracción, al igual que la reflexión posee una onda incidente, una reflejada y una transmitida. La diferencia es que al tratarse de una incidencia angular el fenómeno se rige bajo la Ley de Snell. Dicha ley se presenta a continuación:

$$\sin \beta = \frac{V_2}{V_1} \sin \alpha$$

En donde,

β = Angulo de transmisión.

V_1 = Velocidad de la onda en el material 1.

α = Angulo de incidencia.

V_2 = Velocidad de la onda en el material 2.

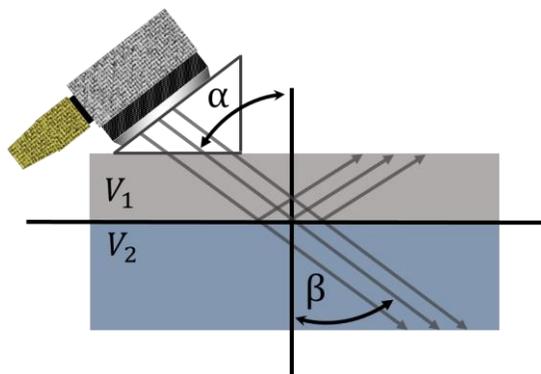


Figura 9.1 Ley de Snell.

Tal y como se aprecia en la Figura 9.1 la Ley de Snell representa perfectamente la incidencia de una onda sonora con un ángulo de incidencia distinto a uno perpendicular. De esta imagen podemos decir que a medida que el ángulo de incidencia aumenta el ángulo de refracción aumenta.

Otro comportamiento que hay que entender en la refracción es que la onda incidente se divide en una onda transmitida y una reflejada. Ocurre la reflexión y la refracción.

Cuando la onda longitudinal incide angularmente sobre un plano de materiales con diferencia en impedancia acústica la onda puede generar un fenómeno llamado “Conversión de Modo” en el cual la onda longitudinal incidente se convierte en una onda longitudinal transmitida y una transversal transmitida.

Este hecho se atribuye a la diferencia en impedancia acústica que induce un cambio en el comportamiento de la vibración de las partículas traducido en la formación de una onda transversal a partir de una longitudinal. En la Figura 9.2 se esquematiza el fenómeno planteado.

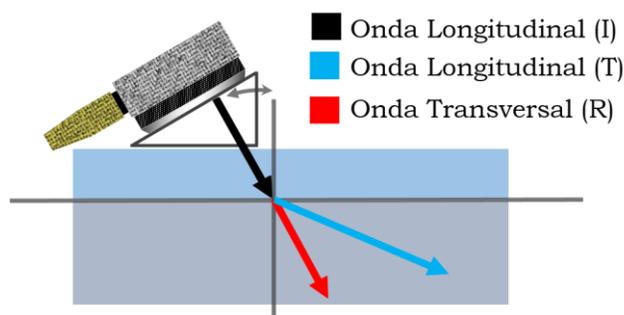


Figura 9.2 Conversión de Modo.

Es importante acotar que se generan dos ondas a partir de una sola. Es decir, solamente una parte de las partículas de la onda incidente se convierte en un tipo de onda diferente.

9. Ángulos críticos

Bien sabemos que el ángulo de incidencia es fundamental para los cálculos basados en la Ley de Snell. Recordando la formula tenemos que:

$$\sin \beta = \frac{V_2}{V_1} \sin \alpha$$

Que sucedería si el ángulo de incidencia α llega a un valor que genera que el $\sin \beta$ sea igual a uno (01). Cuando ocurre este fenómeno hablamos de que el ángulo α es un ángulo crítico.

Por lo tanto, matemáticamente lo podríamos establecer de la siguiente manera:

$$\sin \alpha_{crit1} = \frac{V_1}{V_2}$$

Ahora bien, es importante recordar que tenemos dos ondas transmitidas, la longitudinal transmitida y la transversal transmitida. Debido a esto se tiene la existencia de dos ángulos críticos, uno para cada onda transmitida.

El primer ángulo crítico ocurre cuando el ángulo de la onda longitudinal transmitida es igual a 90° . A continuación, se presenta una ilustración de dicho fenómeno.

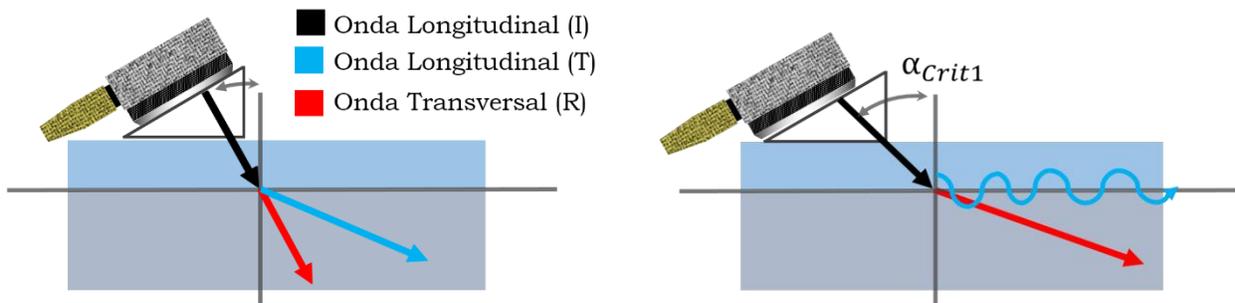


Figura 10.1 Primer ángulo crítico.

Podemos apreciar en la Figura 10.1 que la onda longitudinal transmitida viaja a través de la interfaz de los dos materiales. Si aplicamos la Ley de Snell para el caso en que se presenta el primer ángulo crítico podemos obtener la siguiente ecuación:

$$\sin \alpha_{crit1} = \frac{V_1}{V_2}$$

Esta ecuación también es aplicable para el segundo ángulo crítico, en el cual la onda transversal transmitida posee un ángulo igual a 90° . A continuación, se presenta una ilustración de dicho fenómeno.

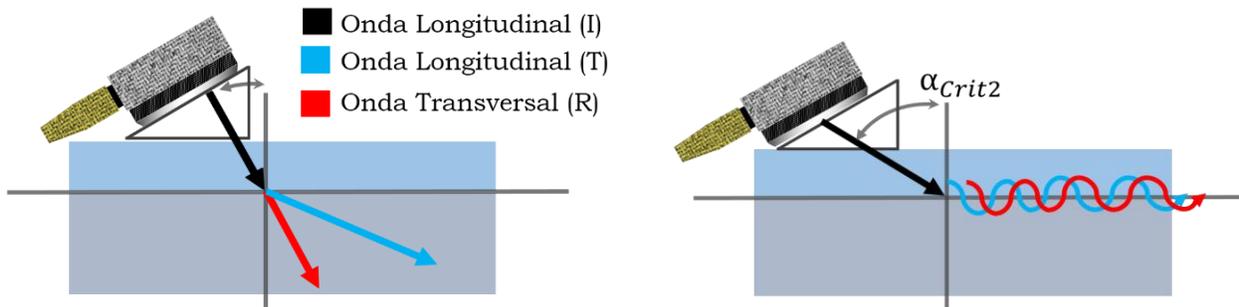


Figura 10.2 Segundo ángulo crítico.

Al igual que en el primer ángulo crítico se aprecia cómo se genera una onda que viaja a lo largo de la interfaz de los dos materiales. Este segundo ángulo crítico es el que se utiliza cuando se quiere trabajar con ondas superficiales.

A manera de evaluar este fenómeno de manera visual evaluaremos el efecto del ángulo de incidencia sobre la amplitud, de cada una de las ondas, en la siguiente figura.

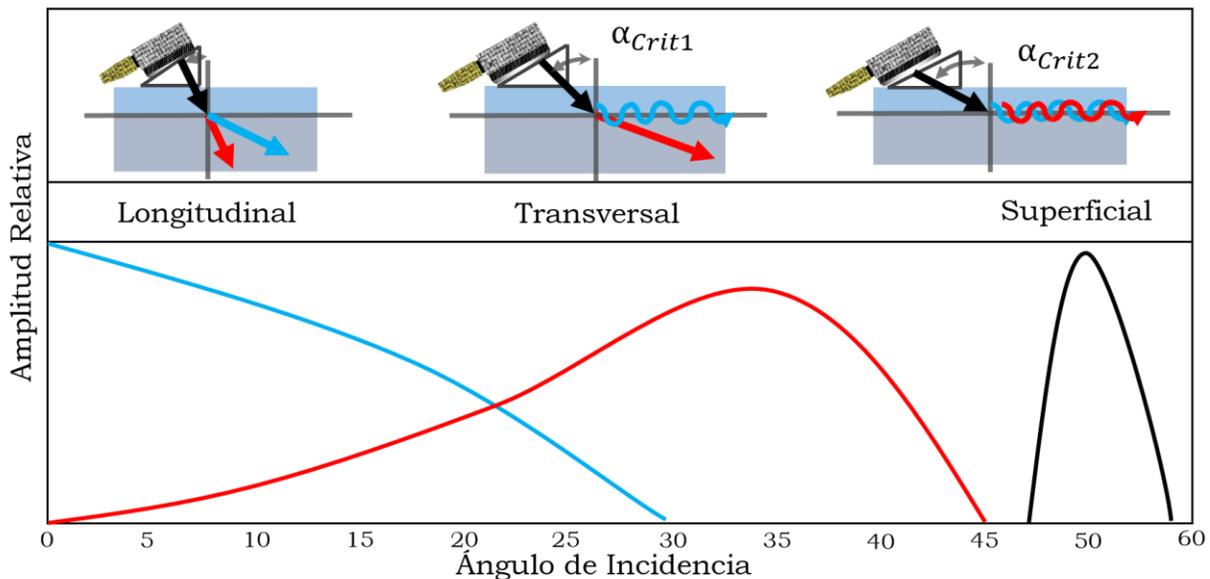


Figura 10.3 Amplitud relativa en función del ángulo de incidencia.

Tal y como apreciamos en la Figura 10.3 podemos ver que en el primer tramo a medida que el ángulo de incidencia aumenta la onda longitudinal empieza a disminuir en amplitud y la onda transversal a aumentar. Es evidente que lo estudiado anteriormente concuerda con este comportamiento ya que se refractan dos tipos de onda a partir de una sola.

Al aumentar el ángulo de incidencia se llegará al primer ángulo crítico en donde sabemos que la onda longitudinal será refractada en un ángulo de noventa grados. Queda claro que a cualquier ángulo por encima del primer ángulo crítico no se tendrán ondas longitudinales refractadas.

Una vez que sobrepasamos el primer ángulo crítico podemos ver en la Figura 10.3 como la amplitud de la onda transversal aumenta hasta que llega a un punto máximo y luego empieza a descender. Si el ángulo de incidencia sigue aumentando se llegará al segundo ángulo crítico en el cual sabemos que la onda transversal será refractada en un ángulo de noventa grados. Es evidente en la imagen que por encima del segundo ángulo crítico no se encontrarán ondas transversales refractadas.

10. Haz Ultrasónico y Zonas de Fresnel y Fraunhofer

Para el estudio del haz ultrasónico y cada una de sus partes el punto de partida a utilizar será la siguiente figura.

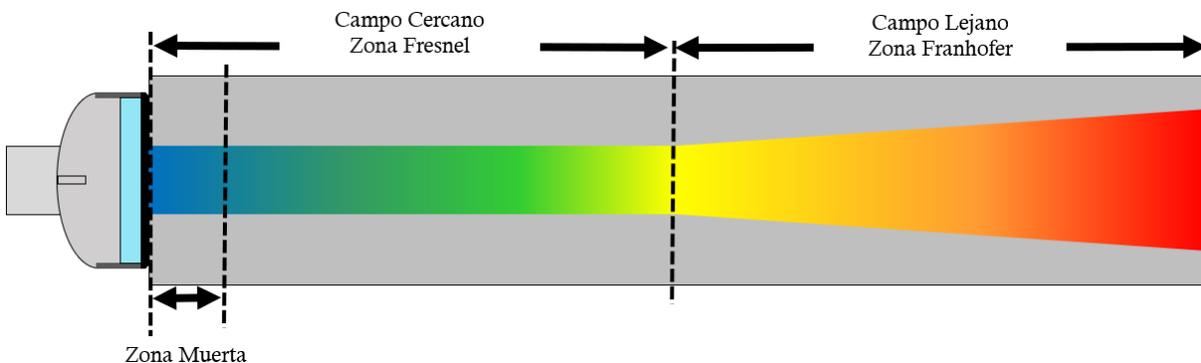


Figura 10.1 Haz Ultrasónico.

En la Figura 10.1 podemos ver que el haz ultrasónico tiene señaladas 3 partes.

- Zona Muerta
- Campo Cercano, conocido como Zona Fresnel.
- Campo Lejano, conocido como Zona Fraunhofer.

La zona muerta no es propiamente una sección del haz ultrasónico, pero es producto de la inspección ultrasónica y es muy importante tenerla en cuenta. De la Zona Muerta hablaremos más adelante, en esta sección solamente hablaremos del campo cercano y lejano.

10.1 Zona Fresnel – Campo Cercano

Como podemos ver en la Figura 12.1 el campo cercano inicia desde el punto en donde se genera el haz ultrasónico y continua hasta el punto donde inicia el campo lejano.

El campo cercano se caracteriza por tener variaciones de intensidad debido a la interacción de máximos y mínimos para la generación del haz ultrasónico. Aquí retomamos el tema explicado anteriormente acerca de la superposición constructiva y destructiva.

Por lo tanto, el campo cercano es una zona en donde las ondas sonoras están interactuando entre sí y por lo tanto la intensidad presente en esta zona varia.

Producto de esta variabilidad de la intensidad tenemos que decir que esta zona no permite la medición de ningún valor.

Para explicar de una manera un poco más sencilla este fenómeno lo ilustraremos con 1 siguiente figura.

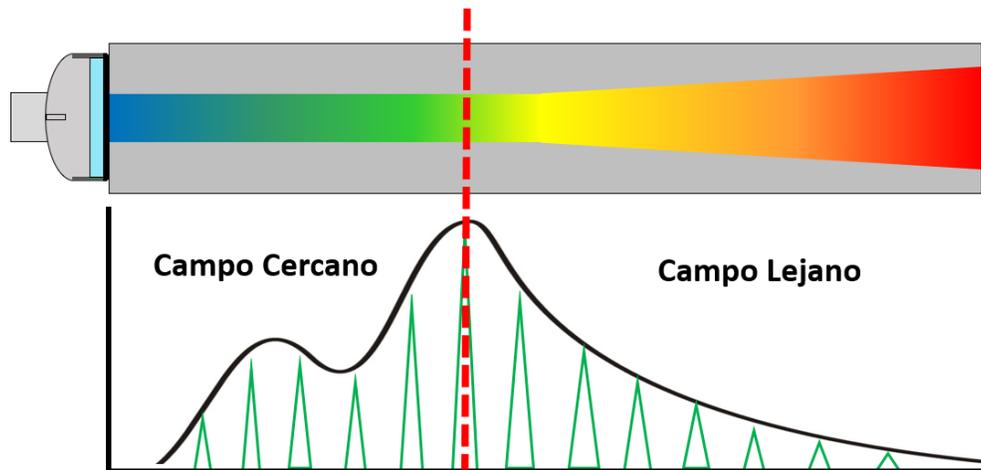


Figura 10.1.1 Variación de intensidad en el haz ultrasónico, referente al campo cercano y al campo lejano.

Tal y como se comentó anteriormente y se aprecia en la Figura 12.1.1 se ve que la intensidad en el campo cercano presenta variaciones de intensidad muy evidentes. Este comportamiento no es un comportamiento confiable como para poder hacer mediciones confiables.

Si observamos la variación de intensidad del campo lejano vemos que el comportamiento es exponencial y constante. Lo cual nos permite tener confiabilidad en la operación.

Ahora bien, esto no significa que en el campo cercano estemos “ciegos” en nuestra inspección, el equipo si va a tener la capacidad de encontrar discontinuidades en el campo cercano pero el gran problema es que no vamos a poder evaluar discontinuidades debido a que la medición de la amplitud no es fiable.



Entonces para la inspección ultrasónica el conocimiento del tamaño del campo cercano es fundamental y se debe definir de manera adecuada para la inspección a realizar. Mediante la siguiente formula se puede calcular la longitud del campo cercano.

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{A}{\pi\lambda}$$

En donde,

D = Diámetro del cristal piezoeléctrico

N = Tamaño del campo cercano

λ = Longitud de Onda

A= Área del Transductor

El cálculo de N es muy sencillo, pero como inspectores tenemos que entender cuales son los factores que van a afectar la longitud de N. Esto lo haremos con los siguientes puntos:

- ✓ Si recordamos la siguiente formula $\lambda = \frac{v}{F}$ y la sustituimos en la fórmula de N, tendremos que $N = \frac{D^2 F}{4v}$
- ✓ De la formula anterior podemos deducir lo siguiente:
 - A medida que el diámetro del cristal piezoeléctrico aumenta, aumentara el campo cercano.
 - A medida que la frecuencia aumente, aumentara el campo cercano.

10.2 Zona Fraunhofer – Campo Lejano

En la Figura 12.1.1 podemos apreciar claramente que el Campo Lejano inicia luego del último punto de máxima amplitud. Luego de ese punto de inicio el comportamiento del campo lejano sigue un comportamiento exponencial.

La caída de la intensidad en el campo lejano es un comportamiento exponencial constante a lo largo de toda su extensión. Esto permite que las mediciones que se realicen en esta zona sean confiables.

Ahora bien, ¿Por qué la intensidad de la señal es tan importante para la medición de las discontinuidades? Para responder esta pregunta lo mejor es ilustrarlo con la siguiente figura.

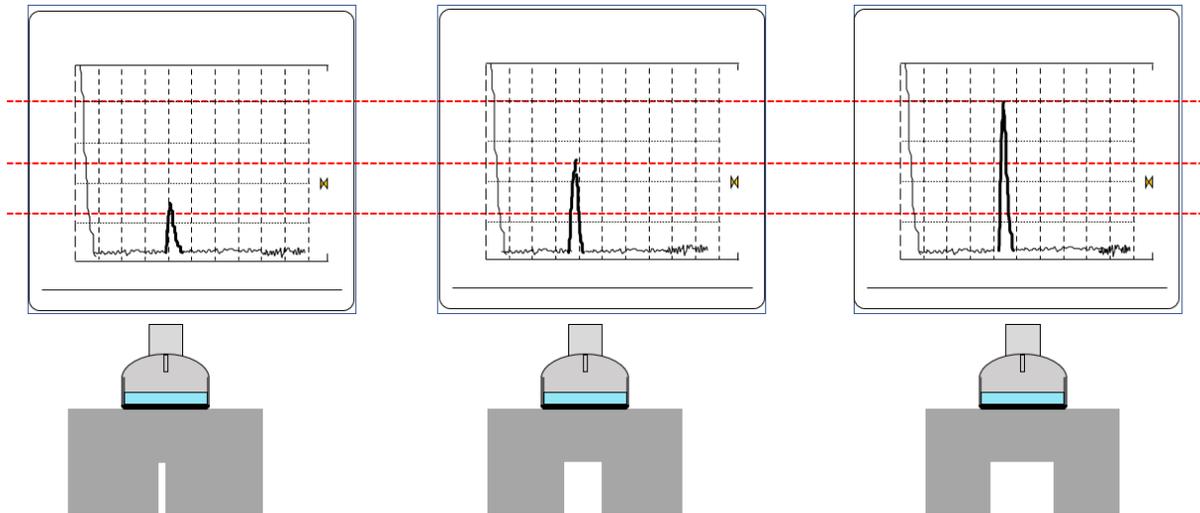


Figura 12.2.1 Variación de amplitud en función del tamaño de la discontinuidad.

Tal y como apreciamos en la Figura 12.2.1 el tamaño de la discontinuidad tendrá una relación con la amplitud de la señal que se obtenga en la imagen del equipo.

Si el comportamiento de la intensidad de la onda ultrasónica no tiene un comportamiento constante entonces los resultados no podrán ser analizados confiablemente. Es por esto que la medición de discontinuidades en el campo cercano no se puede realizar.

10.3 Divergencia del Haz Ultrasónico

El haz ultrasónico tiene volumen y es muy importante entender este concepto ya que es ese volumen que impacta en la discontinuidad y por lo tanto afectara la inspección ultrasónica. Una manera que tenemos de evaluar la forma de ese haz es a través de la divergencia del haz ultrasónico que básicamente lo que determinara es el ángulo de apertura del “abanico” que tiene el haz ultrasónico. Esto lo podemos apreciar en la siguiente imagen.

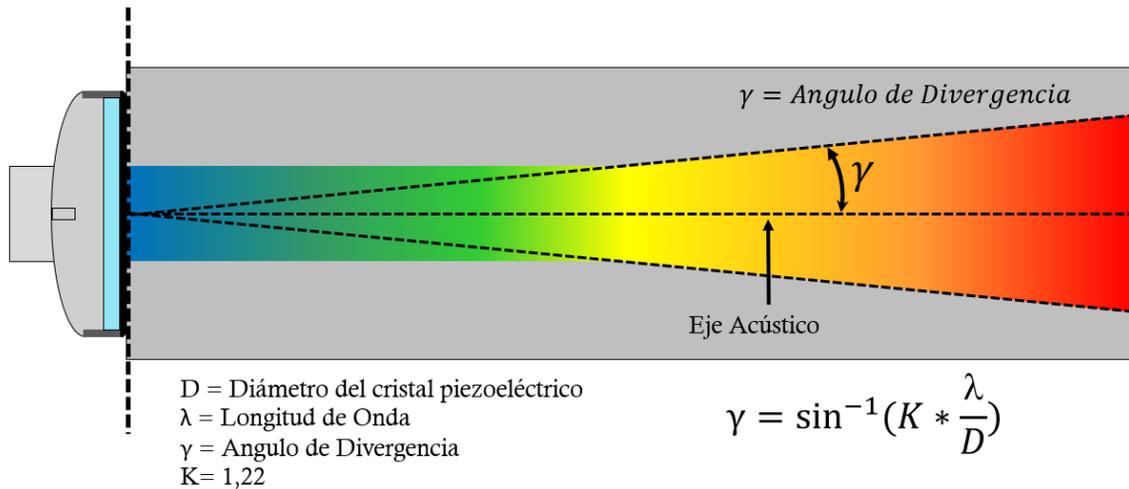


Figura 12.3.1 Divergencia del haz ultrasónico.

En la figura anterior podemos ver que el ángulo de divergencia es un valor que dependerá del tamaño del transductor y de la frecuencia del transductor.

A medida que el ángulo de divergencia aumenta podemos decir que la apertura del haz ultrasónico aumenta y esto desde un punto de vista de la inspección podemos decir que afectará la sensibilidad debido a que menos energía impactará en la discontinuidad.

Pensemos que si el abanico es más pequeño mayor cantidad de energía impactará y por lo tanto tendremos mayor sensibilidad.

Ahora bien, desde un punto de vista práctico podemos relacionar la frecuencia y el diámetro con la divergencia y para ello veamos la siguiente figura.

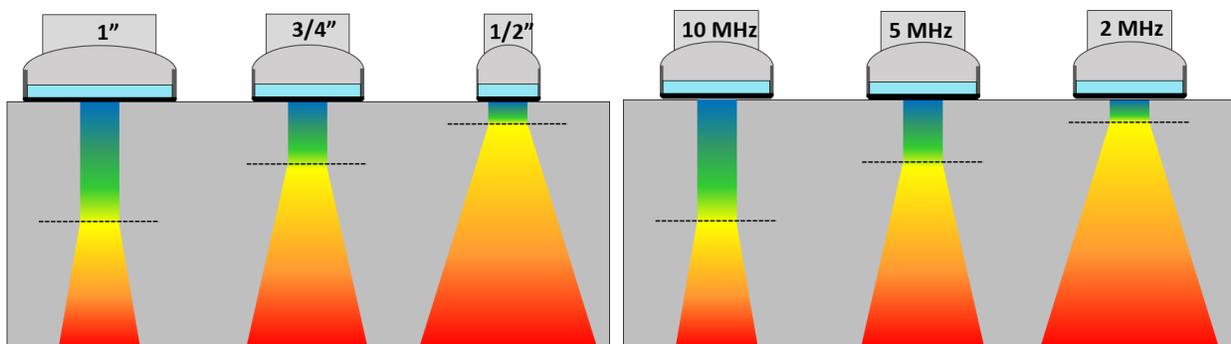


Figura 12.3.2 Efecto de la frecuencia y del diámetro del transductor en la divergencia.

Tal y como se observa en la figura anterior vemos que a medida que el diámetro aumenta la divergencia disminuye. Por otra parte, vemos que al aumentar la frecuencia ocurrirá una disminución de la divergencia.

Otro concepto que es importante conocer es el eje acústico del haz ultrasónico, el eje acústico recorre el eje central del haz ultrasónico. La mayor cantidad de energía ultrasónica se encuentra en este eje central y esto se puede apreciar con la siguiente figura.

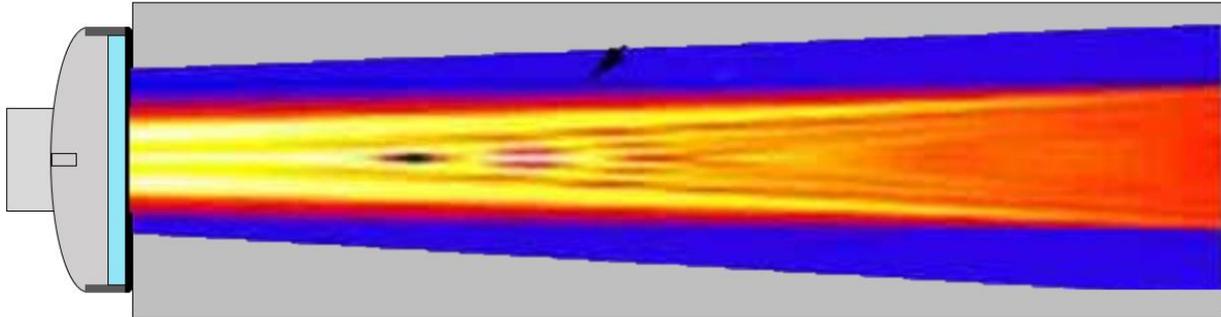
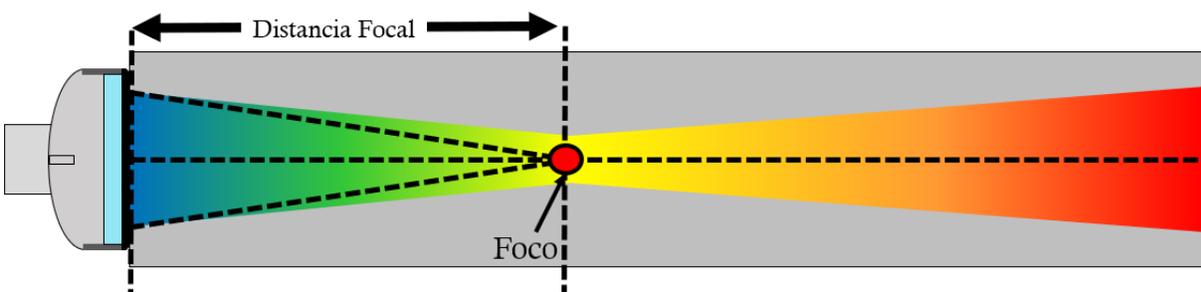


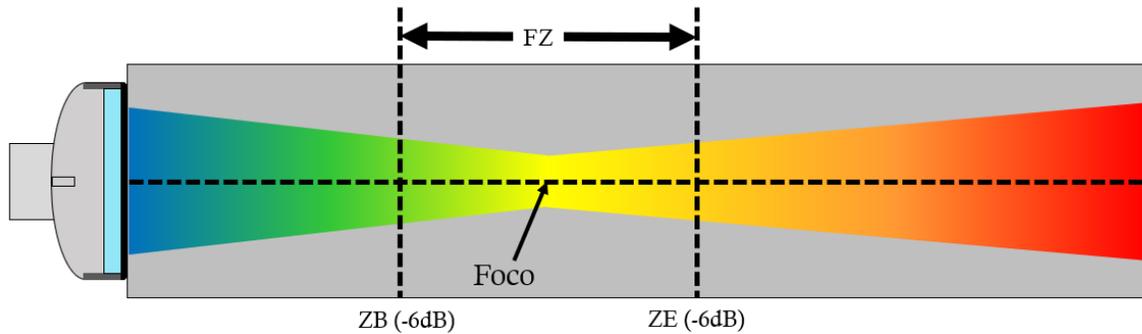
Figura 12.3.3 Eje central en el haz ultrasónico.

Si evaluamos la figura anterior se aprecia claramente como en el eje central la cantidad de energía es mayor. Esto lo podemos afirmar ya que las zonas cálidas/blancas son las que tienen más energía. A medida que nos movemos hacia los bordes la cantidad energética es mucho menor.

10.4 Focalización en el Haz Ultrasónico

El haz ultrasónico va a tener un foco en el cual converge el haz ultrasónico y debido a la concentración de energía se aumenta la sensibilidad. La distancia hasta dicho punto se denota como F , siendo la distancia focal.





También podemos hablar acerca de la zona focal, esta zona focal es en la zona en donde la energía ultrasónica converge y se tendrá mayor sensibilidad. La extensión de la zona focal va desde los -6dB, en relación a la amplitud máxima en el foco, hasta los próximos -6dB en el eje central del haz ultrasónico.

Capítulo 3: Equipo de Inspección

Los equipos de ultrasonido al igual que la mayoría de los equipos del área de ensayos no destructivos se basan en comparaciones.

Decir que se basan en comparaciones es decir que utilizan referencias conocidas para poder evaluar objetos desconocidos. Para poder decirle al equipo cual es esa referencia conocida se utilizan los patrones de referencia.

Por lo tanto, el proceso de calibración del equipo no es solo es recomendada, sino que es necesaria para el funcionamiento adecuado del equipo. Los equipos de inspección se diseñan para una aplicación específica y se le debe decir al equipo que está viendo mediante la calibración para que sea capaz de interpretar los datos y generar resultados.

Si revisamos la práctica recomendada SNT-TC-1A, tenemos dos definiciones que nos pueden apoyar para esta explicación.

- **Calibración, Instrumento:** La comparación de un instrumento con una referencia, normalmente trazable al Instituto Nacional de Estándares del país aceptable.
- **Estandarización, Instrumento:** el ajuste de un instrumento de NDT usando una referencia apropiada para obtener o establecer una respuesta conocida y reproducible. (Normalmente se ejecuta previo a la examinación, pero puede ser efectuada en cualquier momento que se tenga duda en la respuesta del equipo).

1. Tipos de Equipos de Ultrasonido

Existe una gran variedad de equipos de ultrasonido en el mercado y evidentemente los tipos de equipo los podríamos categorizar por las técnicas de inspección que realizan. Pero de manera general dividiremos los tipos de equipos en tres grupos. Los cuales son:

- ✓ **Medidores de Espesores:** Estos equipos son diseñados para la medición rápida de espesores. Una de sus aplicaciones principales es para líneas de producción en donde se desea saber si la pieza pasa o no una condición conocida. Este tipo de equipos basan su presentación de resultados en una representación numérica y en caso de que tengan una imagen Tipo-A esta sería secundaria.

Debido a la forma de la presentación de los resultados este tipo de equipos son excelentes para aplicaciones puntuales en donde se sabe exactamente lo que se está viendo. No son equipos destinados para dimensionamiento de fallas.

En la siguiente figura podemos ver algunos ejemplos de medidores de espesores.



Figura 1.1 Medidores de Espesores.

- ✓ Detectores de Fallas: Los equipos de detección de fallas son equipos que se utilizan para la evaluación de la integridad interna de los productos. La representación de los resultados se basa en una imagen Tipo-A que permite evaluar más detenidamente una falla. Con este tipo de representaciones se pueden buscar grietas, fallas, delaminaciones, entre otras discontinuidades.

Este tipo de equipos se utilizan cuando la pieza a evaluar tiene defectos que pueden tener varias naturalezas y varios orígenes. Por lo tanto, se puede estimar que se va a encontrar, pero realmente no se sabe que hay hasta que se evalúa y es por ello que se necesita un equipo de detección de fallas. En la siguiente figura podemos ver algunos ejemplos de detectores de fallas.



Figura 1.2 Detectores de Fallas.

- Equipos de Defectología Avanzados: Este tipo de equipos al igual que los detectores de fallas basan su evaluación en imágenes Tipo-A. La diferencia que tienen es que implementan algoritmos de evaluación para obtener resultados mediante técnicas ultrasónicas un poco más avanzadas que una imagen Tipo-A convencional.

Algunas de las técnicas que podríamos agrupar en este tipo de equipos serian: Arreglo de Fase (PAUT), Difracción de Tiempo de Vuelo (TOFD) y el Método de Focalización Total (TFM).

En la siguiente figura podemos ver algunos ejemplos de equipos de Defectología Avanzados.



Figura 1.3 Equipos de Defectología Avanzados.

2. Tipos de Imágenes en Ultrasonido

Hoy en día es muy sencillo entender el concepto de pantalla, solamente hay que observar un “smartphone”. Toda la información que podemos ver en el celular es representada por la pantalla de este dispositivo y exactamente lo mismo ocurre en los equipos de ultrasonido, la pantalla es la interfaz que permite al inspector observar/analizar/evaluar los resultados de la inspección.

La pantalla es indiscutiblemente el medio que permite el análisis de la información, pero antes de hablar de los tipos de pantallas que existen observemos la siguiente figura.

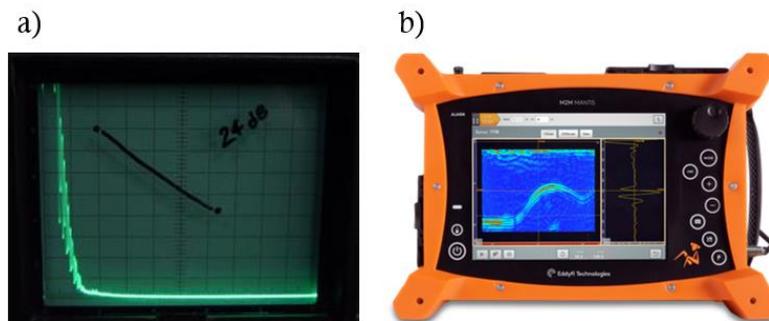


Figura 2.6.1 Pantallas de Equipos. a) Pantalla de Tubo de Rayos Catódicos. b) Pantalla Digital – LCD.

En la Figura 2.6.1 podemos observar la diferencia entre los primeros equipos de inspección ultrasónica con los más modernos. La diferencia evidentemente es radical y esto se debe a los avances de la tecnología.

Debido a la calidad de las imágenes que podemos tener hoy en día es necesario hablar acerca de los pixeles y la resolución.

Los pixeles son cada una de los cuadrados que genera la pantalla y cada uno de estos pixeles toma un color y el conjunto de todos los pixeles de la pantalla genera la imagen como tal. En la siguiente figura podemos ver la representación de una cuadrícula de pixeles.

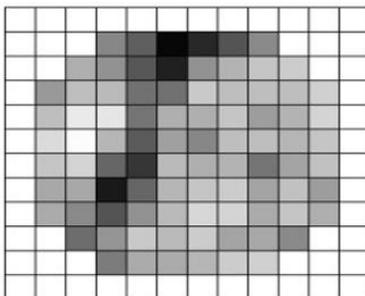


Figura 2.6.2 Cuadrícula de Pixeles.

En la Figura 3.6.2 vemos múltiples cuadrados en la cuadrícula, cada cuadrado es un pixel. Ahora bien, la cantidad de pixeles que tenga nuestro equipo de inspección determinará la calidad de la imagen que podrá representar y esto se puede explicar fácilmente mediante la siguiente figura.

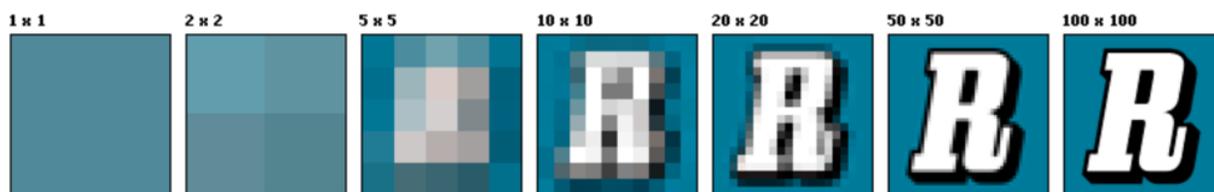


Figura 2.6.3 Resolución.

En la Figura 2.6.3 apreciamos como de izquierda a derecha la cantidad de pixeles va incrementado, en la primera de la izquierda tenemos 1 pixel, luego 4, luego 25 y así sucesivamente hasta llegar a 10000 pixeles.

Al aumentar la cantidad de pixeles mejoramos drásticamente la resolución y vemos como en la imagen de 100x100 pixeles vemos de manera nítida la letra R. Aquí se observa la importancia de los pixeles y la resolución de los equipos de inspección.

Las pantallas digitales y los procesadores implementados hoy en día nos permiten generar imágenes con la información producida por los ecos de la inspección.

Estas imágenes van a permitirle al inspector evaluar la información de distintas maneras, que dependiendo de la aplicación beneficiara o no.

La selección adecuada de la imagen será determinante para poder producir un buen análisis de los resultados.

Los tipos de imágenes más comunes son:

- Imagen Tipo A
- Imagen Tipo B
- Imagen Tipo C

2.1 Imagen Tipo A

La imagen tipo A-Scan es la más básica que se puede tener en ultrasonido, el resto de las representaciones se generan a partir del A-Scan. Este tipo de imagen permite conocer la distancia a la que se encuentra la discontinuidad y la amplitud de la onda. En la Figura 2.1 se aprecia dicha representación.



Figura 2.1.1 Imagen tipo A-Scan.

De la figura anterior podemos mencionar que el eje vertical representa la amplitud de la onda y el eje horizontal el tiempo. El pulso generado por la onda ultrasónica está representado por la línea amarilla.

2.2 Imagen Tipo B

En segundo lugar, se tiene la representación tipo B-Scan la cual provee una visión de la pieza a lo largo de uno de sus ejes.

Esta imagen se obtiene mediante un conglomerado de imágenes Tipo A. El equipo procesa la información y genera esta nueva imagen. La manera para obtener múltiples imágenes tipo A para ser procesada es moviendo el transductor a lo largo de un eje, posteriormente el equipo procesa la información y se obtiene una imagen como la presentada en la siguiente figura.

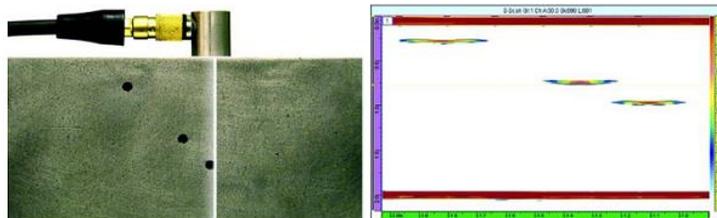


Figura 2.2 Imagen tipo B-Scan.

Si detallamos en la Figura 2.2 en la Imagen Tipo B podemos decir que el eje vertical representa el espesor de la pieza y por lo tanto la profundidad de la discontinuidad mientras que el eje horizontal será la longitud de la pieza (o el recorrido de la inspección).

Ahora bien, si queremos evaluar la amplitud de cada una de las señales debemos pensar que eso se aprecia en la Imagen Tipo A pero la visualización de la amplitud en la Imagen Tipo B se aprecia por la paleta de colores, el color nos dará un valor de amplitud.

2.3 Imagen Tipo C

Tal y como observamos que la imagen Tipo B se genera a partir de una unificación de imágenes tipo A tenemos que decir que ocurre lo mismo con la imagen Tipo C. La diferencia es que en este caso no ocurre solamente en un eje, sino que se requieren dos ejes.

Por lo tanto, podemos decir que el tipo de visualización C-Scan muestra la pieza en dos dimensiones.

Para sistemas de inspección que deseen obtener este tipo de imagen se requiere de un encoder que permita mover el transductor a las coordenadas requeridas para poder producir este tipo de imagen. En la Figura 2.3.1 se visualiza esta representación.

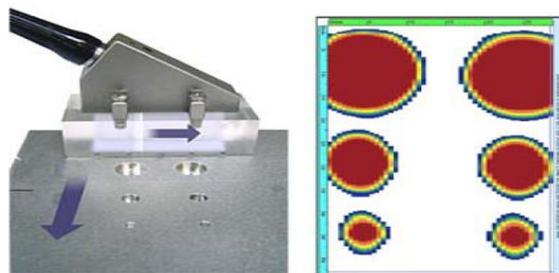


Figura 2.3.1 Imagen tipo C-Scan. ^[18]

Podemos decir de la Figura 2.3.1 que observamos una vista aérea de la pieza inspeccionada, en donde podemos apreciar la imagen en dos dimensiones. Por otra parte, y al igual que la imagen tipo B, la amplitud la evaluamos por la paleta de colores de la imagen.

3 Transductores

Los transductores son una pieza clave en el sistema de inspección de ultrasonido. Este componente genera las vibraciones mecánicas utilizadas para introducir el ultrasonido en el componente evaluado. Existen diferentes tipos de transductores, pero el más utilizado es el transductor electromecánico que funciona bajo el fenómeno piezoeléctrico (En este manual no se contemplan otros tipos).

El diseño del transductor dependerá de las especificaciones del fabricante y la selección se basará, entre otros factores, en la aplicación. De manera general, existen 4 tipos de transductores:

1. Haz recto de contacto.
2. Haz angular de contacto.
3. Doble cristal de contacto.
4. De inmersión.

A continuación, se presenta un ensamble típico de un transductor de haz recto:

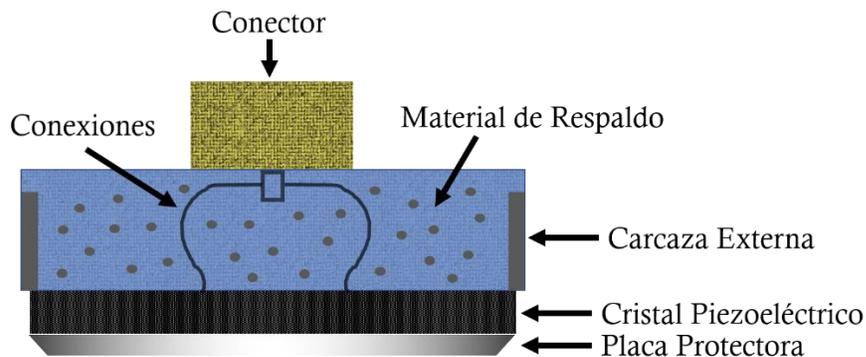


Figura 3.1 Transductor Ultrasónico.

Cada una de las piezas señaladas en la Figura 3.1 posee un efecto determinante en el funcionamiento del transductor. Es por ello que a continuación se explicara cada uno de ellos en detalle.

3.1 Transductores de Haz Recto

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de un transductor de haz recto.

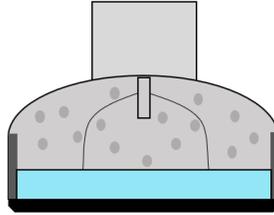


Figura 3.1.1 Transductor de Haz Recto.

Este tipo de transductores poseen un único cristal piezoeléctrico con el que generan la onda ultrasónica. Normalmente están destinados para la generación de ondas longitudinales y por lo tanto para aplicaciones que utilicen este tipo de onda.

Algunas de las aplicaciones comúnmente conocidas que implementan ondas longitudinales son la detección de defectos laminares y medición de espesores.

3.2 Transductores de Haz Recto con Línea de Retardo

A los transductores de Haz Recto se le puede colocar una línea de retardo. En la siguiente figura se muestra un ejemplo.

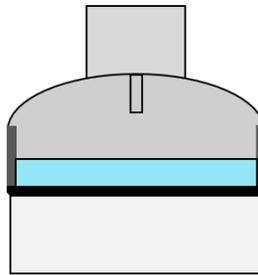


Figura 3.2.1 Transductor de Haz Recto con Línea de Retardo.

La línea de retardo es un componente plástico (plexiglás) que se acopla al transductor y puede ser muy útil para ciertas aplicaciones.

Su nombre línea de retardo se debe a que básicamente lo que producirá en la inspección es un retardo en el tiempo de ingreso de la onda ultrasónica al material. Esto mejorara la inspección en la zona cercana a la superficie del material y también mejorara la medición de espesores de materiales delgados.

Las mejoras anteriores en relación al uso de la línea de retardo se deben a que ese retardo producirá que el campo cercano presente en el material se vea reducido y aparezca mas bien en la línea de retardo.

Ahora bien, para hacerlo de una manera mas puntual colocaremos algunas de las ventajas de implementar un transductor con línea de retardo:

- Proporciona buena resolución cercana.

- Cuando la línea de retardo tiene un contorno adecuado a la superficie mejora el acoplamiento en superficies curvas.
- Proporciona protección al transductor aumentando su tiempo de vida útil.
- Mejora las capacidades de inspección sobre materiales con temperaturas elevadas.

3.3 Transductores de Haz Angular

Estos transductores poseen un único cristal piezoeléctrico con el que generan la onda ultrasónica. La diferencia con los transductores de haz recto es que estos utilizan una zapata, normalmente de plástico (plexiglás), para la generación de ondas transversales.

La onda transversal se genera por la refracción con la zapata, generando una onda ultrasónica que ingresa al material con un ángulo establecido.

Las zapatas tienen múltiples diseños y ángulos, pero si hablamos de las zapatas estándar podríamos decir que los ángulos de refracción que poseen son de 30, 45, 60 y 70 grados.

De manera general podemos establecer una lista de las aplicaciones de transductores de haz angular:

- Inspección de uniones soldadas.
- Detección y dimensionamiento de grietas.
- Inspección de sistemas de tuberías, tubos, forjas, fundiciones y componentes estructurales.

En la siguiente figura podemos apreciar un ejemplo de transductores de haz angular.

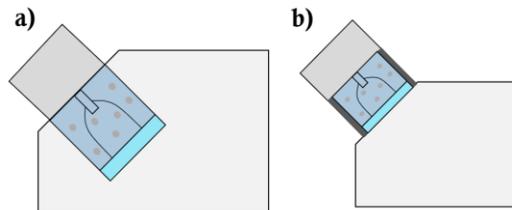


Figura 3.3.1 Transductor de Haz Angular. A) Transductor de Haz Angular con Zapata Fija. B) Transductor de Haz Angular con Zapata Removible.

En la figura anterior apreciamos que el transductor como tal puede estar integrado a la zapata o puede ser removible. En el caso de que sea removible tiene una ventaja debido a que la zapata en si establece el ángulo de refracción y por lo tanto podremos tener distintos ángulos al utilizar diferentes zapatas.

Otro punto importante de tomar en cuenta en los transductores angulares es que hay varios parámetros que afectaran la inspección. De una manera general podemos decir que son dos:

- El punto de salida del haz ultrasónico.
- El ángulo de refracción.

Estos dos puntos se supone que son fijos en las zapatas per es importante tomar en cuenta el desgaste que la superficie de la zapata puede tener con el constante roce con la superficie de inspección.

Es por ello que la verificación del punto de salida y del ángulo de refracción debe ser constantemente revisada para asegurar que los resultados de la inspección con transductor angular sean correctos.

3.4 Transductores duales

Los transductores duales tienen la característica de que poseen dos cristales piezoeléctricos. Uno para transmitir la onda y otro para recibirla.

Estos transductores logran la medición debido a que el haz ultrasónico realiza un recorrido en forma de V. La presencia de ese recorrido en forma de V mejora sustancialmente la medición de espesores en superficies con corrosión o superficies ásperas.

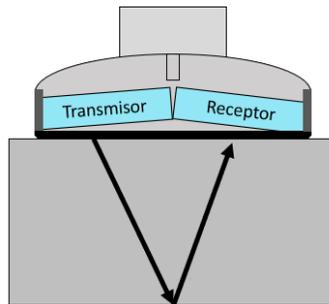


Figura 3.4.1 Transductor dual y el recorrido sonoro.

Como se aprecia en la figura anterior el recorrido sonoro claramente tiene un recorrido en forma de V. A continuación, se listarán algunas de las aplicaciones más comunes para los transductores duales.

Aplicaciones

- ✓ Medición del espesor remanente de pared.
- ✓ Monitoreo de corrosión.
- ✓ Inspección de soldadura de recubrimiento y determinar la adherencia.
- ✓ Detección de discontinuidades, inclusive en espesores delgados.

Al igual que las aplicaciones también se listarán las ventajas de los transductores duales.

Ventajas

- ✓ Con los transductores duales se elimina el disparo principal, mejorando la resolución cercana.
- ✓ El diseño de haz en V proporciona un pseudo foco, que hace más sensible la inspección de formas irregulares como corrosión o picaduras.
- ✓ Buen acoplamiento sobre superficies rugosas.
- ✓ Reduce el ruido en materiales de grano grueso o que tienen alta dispersión.

Ahora bien, debido a la forma con la que el haz ultrasónico viaja cuando se implementan transductores duales se genera una limitante bastante importante e imprescindible de conocer. Esta limitante es el hecho de que los transductores duales tendrán un rango de espesores para los cuales podrá ser utilizado, tendrá un espesor mínimo y uno máximo.

Esto se puede explicar mejor haciendo base en la siguiente figura.

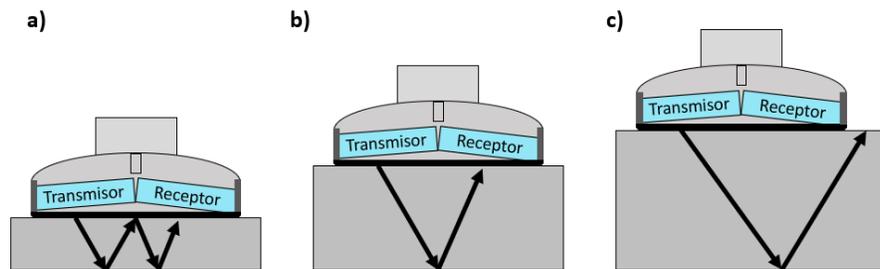


Figura 3.4.1 Limitación de los transductores duales.

Lo que se busca con los transductores duales es que el recorrido sonoro sea como en la parte b de la figura 3.6.3.2. Cuando ocurre esto significa que la medición hizo el recorrido en V y los resultados serán correctos. Pero, ¿qué pasa si el espesor está por encima o por debajo de los permisibles? Lo que va a suceder es que vamos a tener errores e incluso malas interpretaciones de los resultados.

3.5 Transductores de inmersión

Estos transductores están diseñados para la inspección de piezas que se encuentran sumergidas parcial o totalmente. Debido a la condición de inmersión estos transductores tienen la capacidad de resistir inmersión sin comprometer los componentes internos. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de un transductor de inmersión.

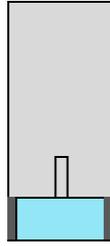


Figura 3.5.1 Transductor de Inmersión.

Estos transductores son comúnmente utilizados para sistemas automatizados de inspección. A continuación, se listan algunas de las aplicaciones de estos transductores.

Aplicaciones

- ✓ Barridos automatizados.
- ✓ Medición de espesores en línea.
- ✓ Detección de fallas a alta velocidad en tubería, barras, tubos, placas y otros componentes.
- ✓ Pruebas de transmisión.
- ✓ Aplicación de la técnica de tiempo de vuelo.

Por otra parte, podemos establecer algunas ventajas.

Ventajas

- ✓ Acoplamiento uniforme que reduce las variaciones de sensibilidad.
- ✓ Reducción del tiempo de barrido gracias a la automatización.
- ✓ Uso de transductores focalizado, que incrementan la resolución y la sensibilidad.

Otra de las características que se tienen que mencionar de los transductores de inmersión es que pueden tenerse de tres formas diferentes.

1. No focalizados.
2. Focalizados Esféricos.
3. Focalizados Cilíndricos.

En la siguiente figura se puede apreciar el efecto de la focalización en el transductor de inmersión.

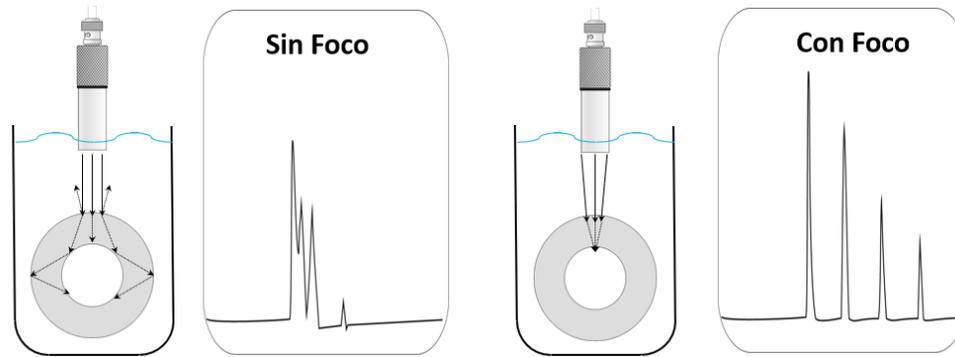


Figura 3.5.2 Transductor de Inmersión con Foco y sin Foco.

La focalización va a depender del radio de curvatura que se le dé la lente del transductor. Podríamos pensar que los lentes acústicos implementados en los transductores de inmersión comparten el diseño con los lentes utilizados para la vista.

3.6 Selección del Transductor

La selección del transductor para el sistema de inspección es una tarea del Nivel III encargado en desarrollar el procedimiento de inspección. Esto se debe a que dependiendo de las características de la inspección ciertos transductores tendrán ventajas y limitaciones con respecto a la inspección.

Algunos de los factores que podemos decir que se deberían tomar en cuenta a la hora de seleccionar el transductor son los siguientes puntos

- Tipo de defecto y material a inspeccionar.
- Profundidad del defecto.
- Criterios de aceptación requeridos.
- Condiciones ambientales.

Estos son algunos de los factores que pueden ser tomados en cuenta, pero también podemos utilizar las siguientes preguntas para esclarecer un poco el panorama.

¿Qué estoy inspeccionando?

Esta pregunta me dará el material y el tipo de material está fuertemente ligado al poder de penetración que debe tener mi sistema.

¿Qué estoy buscando?

Aquí se buscaría responder el tipo de discontinuidad que voy a encontrar. Esto me indicara que nivel de sensibilidad o resolución debería tener en primera instancia para poder encontrar dicha indicación. Ligándolo un poco con la profundidad que podría tener.

¿Cuál es mi criterio de aceptación?

Nuevamente hablamos de la sensibilidad y de la resolución que debe tener mi sistema de inspección.

Evidentemente la selección del transductor impactara directamente los resultados de la inspección y la selección debe ser correcta para ofrecer los mejores resultados. Si nos centramos en la selección de la frecuencia podemos establecer los siguientes puntos:

Transductor con Frecuencia Baja

- ✓ Estas penetran fácilmente a través del material debido a que se presenta menos atenuación.
- ✓ Se utilizan al inspeccionar piezas con granos gruesos o de superficies rugosas ya que se minimiza la perdida por dispersión.
- ✓ El ángulo de divergencia del haz es grande por lo que dificulta la evaluación de defectos pequeños.

Transductor con Frecuencia Alta

- ✓ Emiten un haz de mayor concentración con un mejor poder de resolución.
- ✓ Mayor dispersión del haz por efecto de estructuras de granos gruesos.

De aquí podemos extraer que solamente la selección de la frecuencia impactara en otros factores ya conocidos como la sensibilidad, resolución y penetración. De manera didáctica aquí se presenta una lista de relaciones entre diversas variables del sistema de ultrasonido.

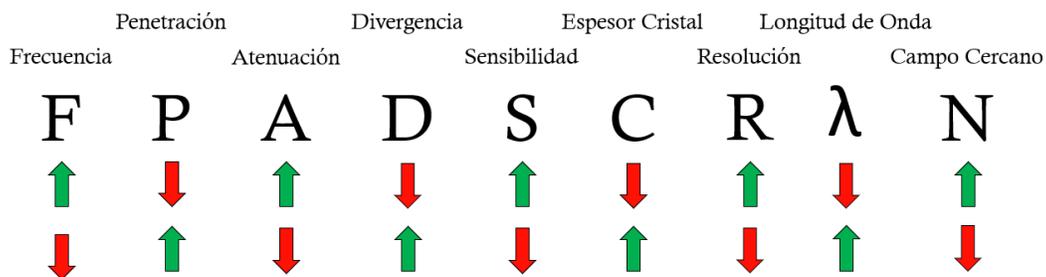


Figura 3.4.1 Variables del sistema de ultrasonido y su interrelación.

Un ejercicio sencillo basándonos en la figura anterior. Si queremos reducir el campo cercano de nuestra inspección deberíamos escoger un transductor con frecuencia baja. Esto también

nos generará un aumento de la penetración, pero reducirá tanto la sensibilidad como la resolución.

Entonces aquí podemos volver a las preguntas. ¿Satisfago los requerimientos de sensibilidad y de resolución? Evidentemente el proceso de selección no es tan sencillo, pero para eso están los procedimientos y los bloques de calibración para garantizar que nuestras inspecciones sean confiables.

4 Cables y conexiones

Los cables y conexiones pueden pasar desapercibidas debido a que solamente son cables de conexión, pero sin estos cables no se puede efectuar ninguna inspección debido a que son cruciales para que el transductor y el equipo de inspección de comuniquen.

Hoy en día existen múltiples tipos de conexiones que pueden ser implementadas y evidentemente cada una tendrá sus ventajas y desventajas. Aquí solamente mostraremos algunas de ellas haciendo uso de la siguiente figura.

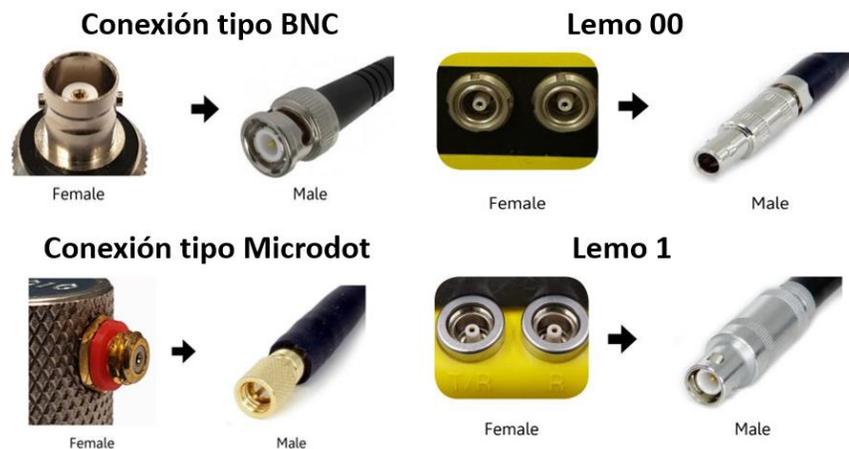


Figura 4.1 Conexiones de los cables implementados en Ultrasonido Industrial.

En la figura anterior se observan cuatro tipos de conectores:

- ✓ Conexión Tipo BNC.
- ✓ Conexión Tipo Microdot.
- ✓ Conexión Tipo Lemo 00.
- ✓ Conexión Tipo Lemo 1.

Ahora bien, ciertamente existen diversos tipos de conectores, pero el cable como tal solamente se implementa un solo tipo. El cable que se utiliza es el cable coaxial. En la siguiente figura se observa el cable coaxial con las partes que lo conforman.

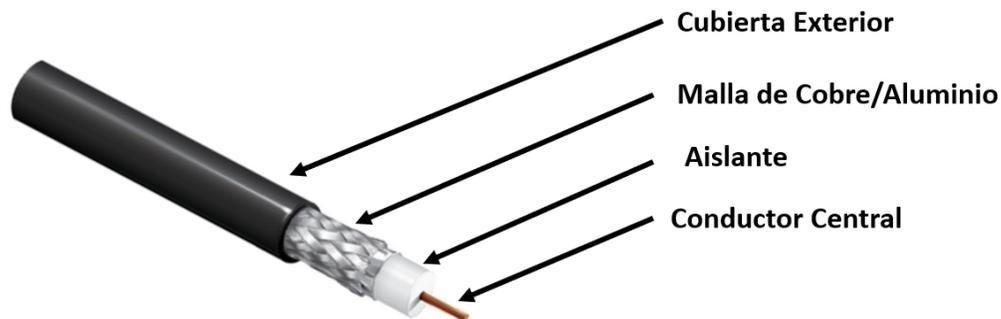


Figura 3.7.2 Cable coaxial y sus partes.

Tal y como se aprecia en la figura anterior el cable coaxial está conformado por un conductor centra, un aislante, una malla de cobre o aluminio y una cubierta exterior que protege el cable.

5 Acoplante

El acoplante es una necesidad para la elaboración de la inspección ultrasónica. La función del acoplante es excluir la presencia del aire entre el transductor y la pieza evaluada para que la onda ultrasónica pueda propagarse a la pieza a evaluar. En la siguiente figura se aprecia como el acoplante liquido elimina el espacio de aire entre el transductor y la pieza evaluada.

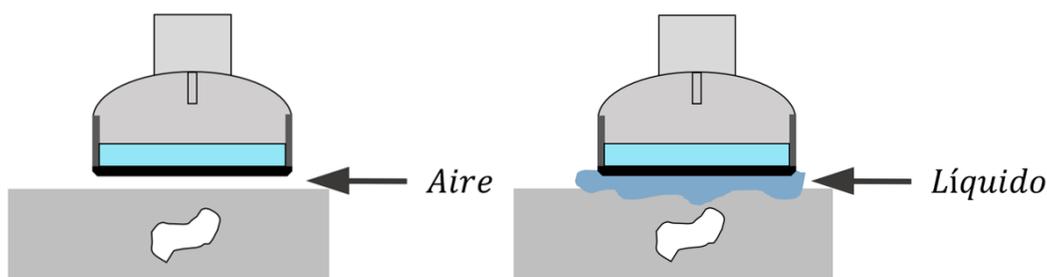


Figura 5.1 Transductor con acoplante y sin acoplante.

Tal y como se aprecia en la figura 5.1 se observa que el líquido elimina el espacio de aire. Tal y como se explicó en la teoría de propagación sabemos que la onda ultrasónica no tiene la capacidad de propagarse en un medio gaseoso como el aire y es por ello que la presencia del acoplante es crucial.

Los acoplantes a utilizar deben cumplir ciertas consideraciones, a continuación, se presentan algunas características:

- ✓ **Mojabilidad**

La mojabilidad es la capacidad que tienen los líquidos de extenderse por una superficie. Lo que se busca con esta propiedad es que el acoplante tenga una buena capacidad de mojabilidad para que esté presente.

Un ejemplo de mala mojabilidad es en el caso de que agua se ponga sobre una superficie encerada, el agua no mojará la superficie. Lo que se busca es el efecto opuesto.

✓ **Viscosidad**

La viscosidad es la capacidad que poseen los fluidos de resistir a las deformaciones. De manera general podemos hablar del espesor que tendría un fluido si se coloca sobre una superficie.

El valor de la viscosidad variara dependiendo de la aplicación a desempeñar, pero de manera general siempre se busca la menor viscosidad ya que el espesor del acoplante será menor y por lo tanto afectara en menor medida los resultados de la inspección.

✓ **No puede generar daños al material a inspeccionar**

Es crucial de que el acoplante no genere ningún daño el material a inspeccionar. Hay que mantener la condición de ensayo no destructivo.

Existen listas de materiales permitidos para ser utilizados como acoplantes. Es muy importante saber que se está inspeccionando para no utilizar algún material que pueda repercutir en un daño del mismo.

✓ **Fácil de remover**

Esta característica es importante para poder dejar el material evaluado tal cual como se encontró.

✓ **No Corrosivos**

El acoplante no se debe reaccionar con el material inspeccionado. Y sobre todo evitarlo con materiales susceptibles a corrosión o agrietamiento. Hay que recordar que el ensayo es no destructivo y no debemos afectar la integridad del componente inspeccionado.

✓ **No Tóxico**

Se debe procurar que el acoplante sea no tóxico para evitar que el personal técnico sufra de intoxicación con el manejo del acoplante.

✓ **Temperatura de la superficie**

Es muy importante saber la temperatura de la superficie ya que el acoplante se puede evaporar. Existen acoplantes especializados para su utilización en superficies con temperaturas calientes. Es muy importante acotar que algunos acoplantes poseen elementos nocivos para el ser humano si se



encuentran en estado gaseoso, es por ello que es muy importante saber la temperatura de la superficie y si el acoplante es seguro de utilizar.

✓ **Atenuación del Acoplante**

Hay que buscar que la atenuación producida por el acoplante sea la mas baja posible para reducir perdidas de la energía de la onda ultrasónica cuando pasa a través del acoplante.

✓ **Impedancia Acústica**

Se debe buscar que la impedancia acústica del acoplantes sea similar a la del material inspeccionado. Esto se busca para que la cantidad de energía transmitida al material sea la mayor posible.

Capítulo 4: Calibración y Bloques de Calibración

1 Calibración

Sabemos que los ensayos no destructivos son técnicas que se basan en mediciones indirectas de ciertas propiedades.

La calibración básicamente es la configuración del sistema de inspección acorde a ciertos valores de referencia que garantiza que la inspección ofrece resultados reales ya que la calibración compara valores de prueba con medidas conocidas.

Por lo tanto, el proceso de inspección es básicamente la comparación de algo conocido con algo desconocido. Es la comparación del patrón con la pieza inspeccionada.

Ahora bien, el termino calibración podemos decir que por la jerga común se conoce como el termino de ajustar el equipo a los valores adecuado para que el equipo de inspección genere los resultados correctos.

Pero vamos a basarnos en la práctica recomendada SNT-TC-1A y vamos a definir Calibración y Estandarización.

Calibración, Instrumento: La comparación de un instrumento con una referencia, normalmente trazable al Instituto Nacional de Estándares del país aplicable.

Estandarización, Instrumento: el ajuste de un instrumento de NDT usando una referencia apropiada para obtener o establecer una respuesta conocida y reproducible. (Normalmente se ejecuta previo a la examinación, pero puede ser efectuada en cualquier momento que se tenga duda en la respuesta del equipo).

De estas definiciones podemos decir que el termino correcto para lo que coloquialmente decimos como calibración es estandarización.

Si hablamos de calibración nos estamos refiriendo al procedimiento de ajuste y comparación con respecto a una referencia trazable al instituto nacional de estándares que como por ejemplo puede ser la calibración por un laboratorio acreditado bajo la norma ISO/IEC 17025.

1. Parámetros generales a considerar en la estandarización

Aquí solamente mencionaremos algunos parámetros fundamentales que se deben estandarizar para que el equipo de ultrasonido pueda ofrecer resultados reales.

1.1 Velocidad

La velocidad es un parámetro que se debe estandarizar en función del material a inspeccionar. Como ya se ha explicado el equipo basa su calculo en el tiempo de vuelo y la velocidad de la propagación para llevar a cabo los cálculos, por lo tanto, la velocidad es fundamental.

1.2 Sensibilidad

La sensibilidad es la capacidad que posee el sistema ultrasónico de mostrar reflectores de cierto tamaño a una distancia determinada. En otras palabras, establece que tan sensible es el sistema para poder mostrar lo que a través de la detectabilidad puede ver.

La sensibilidad en un sistema ultrasónico depende básicamente de cinco factores:

- Angulo del haz ultrasónico.
- Distancia del campo cercano
- Ancho de banda del transductor
- Material del cristal piezoeléctrico
- Relación señal-ruido del sistema

La estandarización del sistema de inspección dependerá de que norma o criterio de aceptación se esté implementando.

1.3 Resolución

La resolución es la capacidad que posee el sistema de inspección de mostrar de manera individual dos indicaciones muy próximas entre sí. Mientras mejor sea la resolución la proximidad entre las indicaciones podrá ser menor y aun así se podrán mostrar dos indicaciones independientes.

Este factor se estandariza con ciertos bloques de calibración que lo permiten.

1.4 Linealidad Horizontal

La linealidad horizontal hace referencia a que la escala horizontal del instrumento de inspección, la escala de distancia, es proporcional al movimiento físico.

En el proceso de estandarización se ajusta de manera adecuada la linealidad horizontal.

1.5 Linealidad Vertical

La linealidad vertical de la pantalla hace referencia a que las variaciones de la amplitud en el eje vertical de la señal tengan un comportamiento lineal.

En el proceso de estandarización se ajusta de manera adecuada la linealidad vertical.

1.6 Señal relación-ruido

El ruido en las señales ultrasónicas degrada la calidad de la imagen de inspección y por lo tanto aumenta la dificultad de analizar de manera correctas las señales obtenidas.

Esa relación entre la señal y el ruido se conoce como SNR (Signal to Noise Ratio). Normalmente se requiere de una relación SNR de un mínimo de 3:1

El ruido como tal tiene múltiples orígenes que tienen que ser tomados en cuenta.

En la siguiente figura podemos apreciar el efecto del ruido en una imagen tipo A.

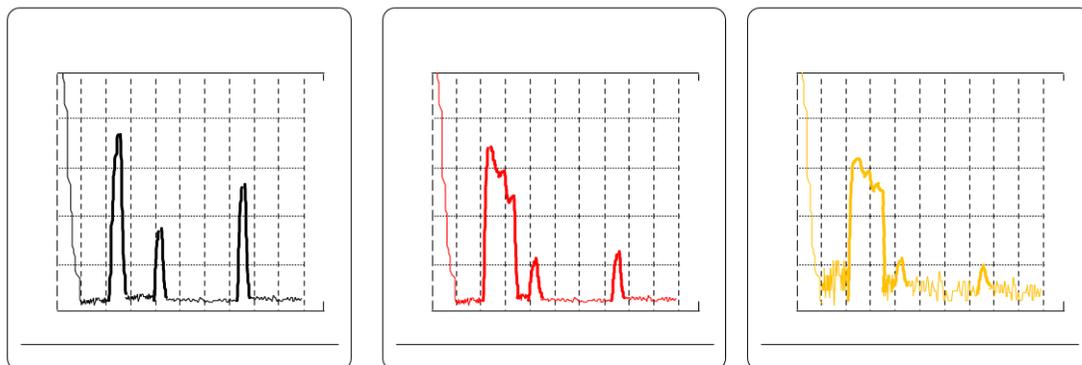


Figura 2.6.1 Efecto del ruido en la imagen tipo A.

Tal y como se aprecia en la figura anterior, se ve como de izquierda a derecha el nivel de ruido aumenta y dificulta la evaluación de las indicaciones.

A continuación, se listarán algunas de las variables que pueden afectar la SNR:

- ✓ El tamaño del transductor y las propiedades focales.
- ✓ La frecuencia y ancho de banda.



- ✓ El recorrido sonoro y la distancia.
- ✓ La interfaz.
- ✓ Aspereza de la superficie.
- ✓ Ubicación de la indicación con respecto al haz.
- ✓ El ruido inherente al material inspeccionado.
- ✓ La reflectividad inherente de la indicación.
- ✓ Indicaciones multifacéticas tenderán a dispersar la reflexión.
- ✓ Tipo de discontinuidad.
- ✓ Tamaño de la indicación. Mayor tamaño produce mejor sensibilidad.
- ✓ Focalización del haz ultrasónico. Mas focalizado produce mejor sensibilidad.
- ✓ La duración del pulso afectara el SNR. Mientras más pequeño el pulso mejor será la detectabilidad.
- ✓ El SNR disminuye cuando la densidad del material o la velocidad de la onda aumentan. El SNR es inversamente proporcional a la densidad y a la velocidad acústica.
- ✓ El SNR usualmente aumenta con la frecuencia. Pero dependiendo del material puede que el SNR sea independiente de la frecuencia.

2. Bloques de Calibración

Dentro de la industria existe una gran variedad de patrones de calibración que se pueden implementar para equipos de ultrasonido. La selección del patrón dependerá de una serie de factores:

1. Aplicación.
2. Material a inspeccionar.
3. Forma y tamaño de la pieza a inspeccionar.
4. Sistema de inspección.
5. Norma y/o procedimiento utilizado.

Para las estandarizaciones los bloques de calibración utilizan reflectores que generan las reflexiones con las que se realizan las mediciones y los ajustes necesarios dependiendo del bloque implementado. A continuación, presentaremos una lista de los reflectores utilizados.

2.1 Reflectores

Reflectores esféricos

Este tipo de reflectores son utilizados mayoritariamente en las técnicas ultrasónicas por inmersión ya que la naturaleza del transductor permite una evaluación del campo ultrasónico del transductor.

Debido a la geometría esférica del reflector la energía sonora se dispersa luego del impacto y no regresa al transductor. Esto es debido a que el área efectiva de reflexión es mucho menor si se compara con un reflector plano del mismo diámetro que el reflector esférico.

Los reflectores esféricos pueden ser fabricados de cualquier material, pero comúnmente se fabrican bolas de acero debido a los siguientes factores:

- ✓ Acabado superficial muy bueno.
- ✓ Se pueden fabricar de tamaños muy pequeños.
- ✓ El costo de fabricación es razonablemente bajo.

Reflectores planos (Flat-Bottom Holes)

Los reflectores planos son norma en calibraciones de contacto y de inmersión. Los reflectores son orificios taladrados con fondo plano (realizados con fresadora). El tamaño de estos reflectores dependerá del bloque de calibración o de la norma implementada pero básicamente lo que variaría sería el diámetro del orificio y su profundidad.

Este tipo de reflectores puede perder un alto porcentaje de la reflexión si hay una desviación del ángulo de incidencia. Por lo tanto, la superficie en donde repose el transductor y el proceso de fabricación del transductor es crucial para que el reflector sea aceptable para la calibración.

Muecas

Las muecas son utilizadas para evaluar la capacidad de detección de grietas próximas a la superficie o que incidan en la superficie, como grietas.

Las muecas tienen una sección plana y una cierta profundidad en relación a la superficie del patrón. Usualmente las muecas son perpendiculares a la superficie del patrón, pero dependiendo del proceso de inspección se pueden requerir que tengan un cierto ángulo en relación a la superficie.

Existen varios procesos de fabricación que se pueden implementar para la elaboración de estos reflectores. Como el uso de una fresadora, sierras circulares, maquinado por descarga eléctrica, entre otros.

Reflectores Laterales

- Los SDH son perpendiculares a la superficie de entrada.
- Este tipo de reflectores provee de mucha repetibilidad.
- Se pueden ubicar a cualquier profundidad de la superficie de entrada
- Puede ser utilizado para ondas longitudinales como para ondas transversales.
- Este tipo de reflector se suele utilizar para la calibración de sensibilidad y curva DAC.

2.2 Bloques de Calibración

2.2.1 Bloques de Múltiples Pasos.

Este tipo de bloques de calibración son excelentes para equipos destinados a la medición de espesores ya que la naturaleza de este bloque es representar diferentes espesores de un mismo material.

Generalmente estos bloques son de superficie plana, pero dependiendo de la aplicación y de la norma del bloque se pueden encontrar curvos. En la norma ASTM E-797 (*Practica Estándar para la medición del espesor por Ultrasonido Manual Método de contacto pulso-eco*) se puede encontrar uno de los estándares para este tipo de bloques. En la siguiente figura se aprecia el croquis que se encuentra en dicha norma:

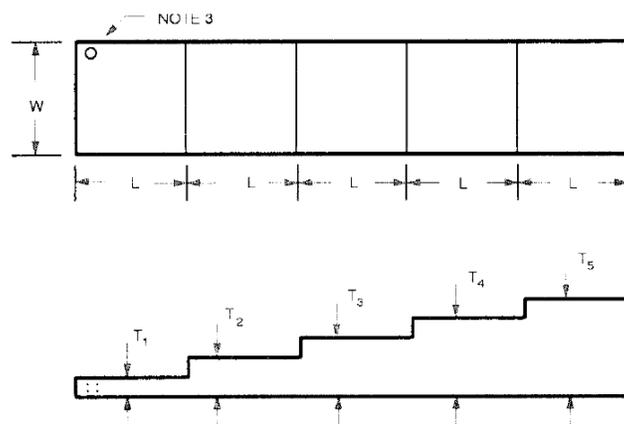


Figura 2.2.1.1 Croquis de un patrón de múltiples pasos según ASTM E-797.

Tal y como se aprecia en la Figura el bloque consiste de varios “pasos” en los cuales cada uno representa un cierto espesor del mismo material.

Este tipo de bloques son especialmente útiles para medición de espesores con transductores duales, ya que sabemos que este tipo de transductor posee un rango mínimo y máximo de penetración de inspección.

2.2.2 Bloques de Distancia/Área Amplitud y Navships

Este tipo de bloques de calibración usualmente se venden en sets de 10 piezas. Básicamente cuentan con un reflector con fondo plano. Estos patrones permiten la medición de la zona muerta, sensibilidad y linealidad de la distancia. En la siguiente figura se aprecia un set de estos bloques:



Figura 2.2.2.1 Set estándar de bloques de distancia/área amplitud.

Tal y como se aprecia en la Figura se aprecia un ser de 10 bloques de aluminio. La norma ASTM E-127 establece la normativa para este tipo de bloques. Por su parte la norma ASTM E-428 establece la normativa para los bloques de acero inoxidable.

Este tipo de bloques son muy buenos para aplicaciones en donde el paso del ultrasonido es lineal ya que la geometría del bloque limita el movimiento. Así que para aplicaciones en donde la aplicación requiera un paso del ultrasonido angular se puede utilizar el bloque conocido como Navship. En la siguiente figura se aprecia dicho patrón:

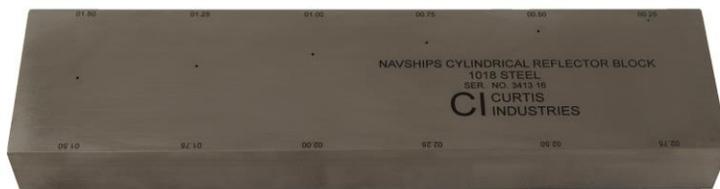


Figura 2.2.2.2 Bloque Navship.

Tal y como se aprecia en la Figura este bloque posee una geometría que permite que el haz ultrasónico tenga un paso angular. Se observa que el principio es exactamente el mismo que los bloques de Distancia/Área ya que también posee reflectores de fondo plano a diferentes profundidades. La diferencia es que todos se encuentran en el mismo bloque y la geometría varía.

2.2.3 Bloque IIW

Este bloque es uno diseñado, por el Instituto Internacional de Soldadura (IIW por sus siglas en inglés), específicamente para la inspección con haz angular. Este se podría decir que es el bloque principal para todas las aplicaciones de inspección angular.

Con este bloque podemos:

- Localizar el punto de salida del haz.
- Verificar y medir el ángulo de refracción
- Calibrar la velocidad
- Calibrar el retraso de la zapata
- Calibrar la sensibilidad del haz angular
- Calibrar la sensibilidad del haz recto
- Calibración de la resolución
- Verificar la penetración

En la norma ASTM E-164, titulada: *“Prácticas estándar para la inspección mediante ultrasonido de contacto de cordones de soldadura”*, podemos encontrar las especificaciones de los bloques tipo IIW.

A continuación, se detallará cada una de las partes del bloque IIW y sus funciones para el proceso de calibración.

- **Cálculo del punto de salida del haz ultrasónico.**

El bloque IIW tiene una sección destinada para el cálculo del punto de salida del haz ultrasónico. En la siguiente imagen se puede apreciar el transductor de haz angular en una cierta posición del bloque para dicho cálculo.

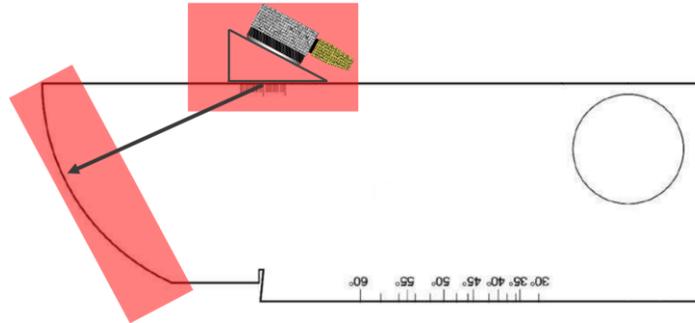


Figura 2.2.3.1 Cálculo del punto de salida del haz ultrasónico.

Como se observa en la figura el transductor de haz angular se coloca en la sección plana más larga del perfil del bloque. Las secciones resaltadas en color rojo son las utilizadas para el cálculo del punto de salida en la zapata.

Es evidente que debido a la geometría planteada el haz ultrasónico se moverá hacia la zona curva del bloque IIW (también resaltada de rojo).

Ahora bien, el procedimiento en si consiste en colocar el transductor en la sección definida. En dicha sección se aprecia una regla graduada la cual permitirá definir cuál es el punto exacto. Este valor se obtiene mediante el movimiento lineal del transductor. En la siguiente figura se aprecia el movimiento.

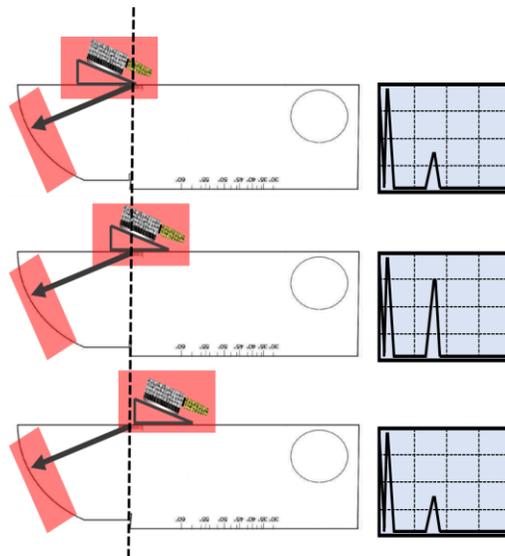


Figura 2.2.3.2 Cálculo del punto de salida del haz ultrasónico. Movimiento lineal.

El movimiento del transductor afectara directamente la altura de pantalla del pico en la imagen A-Scan. Lo que se busca es encontrar el punto más alto posible del A-Scan ya que ese

será el punto de salida del haz ultrasónico. Una vez se establezca la ubicación del punto de salida se deberá ubicar manualmente sobre la zapata del transductor.

- **Verificación y medición del ángulo de refracción**

El bloque IIW tiene una sección destinada para la verificación del ángulo de refracción. En la siguiente imagen se puede apreciar el transductor de haz angular en una cierta posición del bloque para dicha verificación.

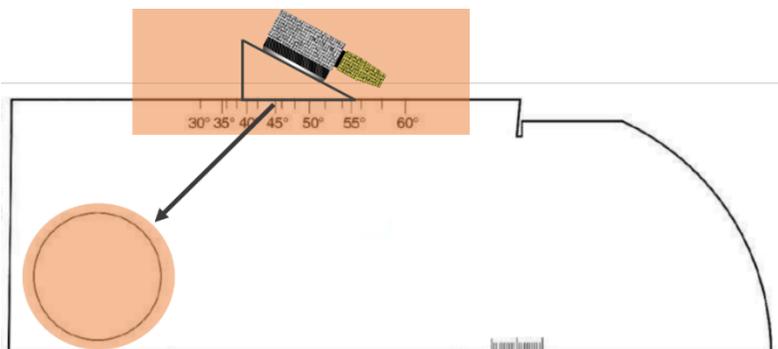


Figura 2.2.3.3 Verificación del ángulo de refracción.

Es importante acotar que esta verificación se debe hacer luego de que el punto de salida del haz ultrasónico haya sido determinado.

La verificación del haz ultrasónico se realiza colocando el transductor tal y como se aprecia en la figura anterior. Luego se deberá mover hacia adelante y hacia atrás y buscar el pico de pantalla es el más alto.

Se seleccionará el ángulo del bloque en función del punto salida que fue marcado en la zapata. El ángulo seleccionado será el que se deberá ingresar en el sistema de inspección. Hay que recordar que existe una tolerancia según la norma que se utilice (normalmente es de 2 grados).

- **Calibración de la resolución**

El bloque IIW tiene una sección destinada para la calibración de la resolución. El único detalle es que para esta calibración el transductor debe ser de haz recto.

En la siguiente imagen se puede apreciar el transductor de haz recto en una cierta posición del bloque para dicha calibración.

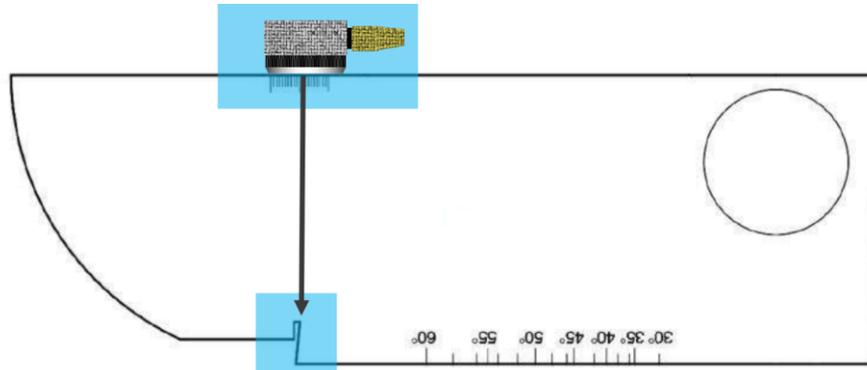


Figura 3.2.3.6 Calibración de la resolución en bloque IIW.

Capítulo 5: Evaluación de discontinuidades

1. Métodos de Evaluación

Cuando una indicación es hallada por el sistema de inspección ultrasónica normalmente se requiere estimar su tamaño para determinar los resultados de la inspección.

El proceso de análisis y de evaluación de las discontinuidades muchas veces recae en la habilidad y experiencia del técnico, además de contar con un equipo que funcione en óptimas condiciones y seguir de manera correcta los procedimientos y normas dispuestos para la evaluación.

De manera general se presentará a continuación una lista de los factores que pueden influir en la correcta evaluación de los resultados de una inspección mediante el método de ultrasonido.

- ✓ Exactitud de la calibración.
- ✓ Tipo de discontinuidad evaluada.
- ✓ Orientación de la discontinuidad.
- ✓ Tamaño de la discontinuidad.
- ✓ Forma de la discontinuidad.
- ✓ Ubicación de la discontinuidad.
- ✓ Tipo y condiciones del material inspeccionado.
- ✓ Características del transductor.
- ✓ Características del haz ultrasónico.
- ✓ La experiencia del personal en la reflexión ultrasónica de una discontinuidad en particular.

1.1 Comparación con reflectores de referencia

Tenemos los siguientes puntos a comentar:

- ✓ Esta técnica de evaluación es aplicable en inspecciones con transductores de haz recto, haz angular y doble cristal.
- ✓ El ajuste de la sensibilidad de la inspección se efectúa contra reflectores de referencia con dimensiones conocidas. Dichos reflectores se encontrarán en los bloques de calibración determinados para dicha inspección.
- ✓ Se requiere maximizar la indicación.
- ✓ Una manera de efectuar la evaluación puede ser mediante la implementación de la curva de distancia-amplitud, mejor conocida como curva DAC.

- ✓ Otra manera que se puede implementar la evaluación es a través de la técnica de la caída de los 6 dB.
- ✓ Otro punto que también se puede ocupar en ocasiones es la compensación por diferencia de atenuación entre la pieza y el bloque de inspección.
- ✓ Este método de evaluación se puede implementar en uniones soldadas, piezas fundidas, piezas forjadas, etc.

A continuación, detallaremos un poco más algunos de los puntos mencionados anteriormente.

1.1.1 Curva de Distancia Amplitud, curva DAC

Como hemos visto hasta ahora sabemos que a medida que la indicación aumenta su profundidad (distancia con respecto al transductor) su amplitud ira disminuyendo producto de la atenuación.

Debido a esto es necesario recurrir a un método de evaluación que permita saber el comportamiento de la amplitud de una discontinuidad en función de su amplitud y para esto justamente es que se implementa la curva DAC. Tal y como su nombre indica DAC es la abreviación en ingles para curva de corrección de la distancia y la amplitud. Por lo tanto, esta curva permitirá saber cómo se comportará la amplitud de una indicación específica en función de la profundidad.

Para generar la curva DAC por lo tanto se requiere ocupar un bloque o bloques de calibración que tengan reflectores del mismo tamaño a profundidades diferentes, una manera de realizar esto es con los bloques ASTM tipo “B”.



Figura 1.1.1.1 Juego de bloques ASTM tipo “B”.

Haciendo uso de estos bloques o de otros bloques indicados se podrá generar la curva DAC. Con fines educativos a continuación se presentará una imagen con un bloque que posee varios reflectores a profundidades diferentes y se verá como se genera la curva DAC.

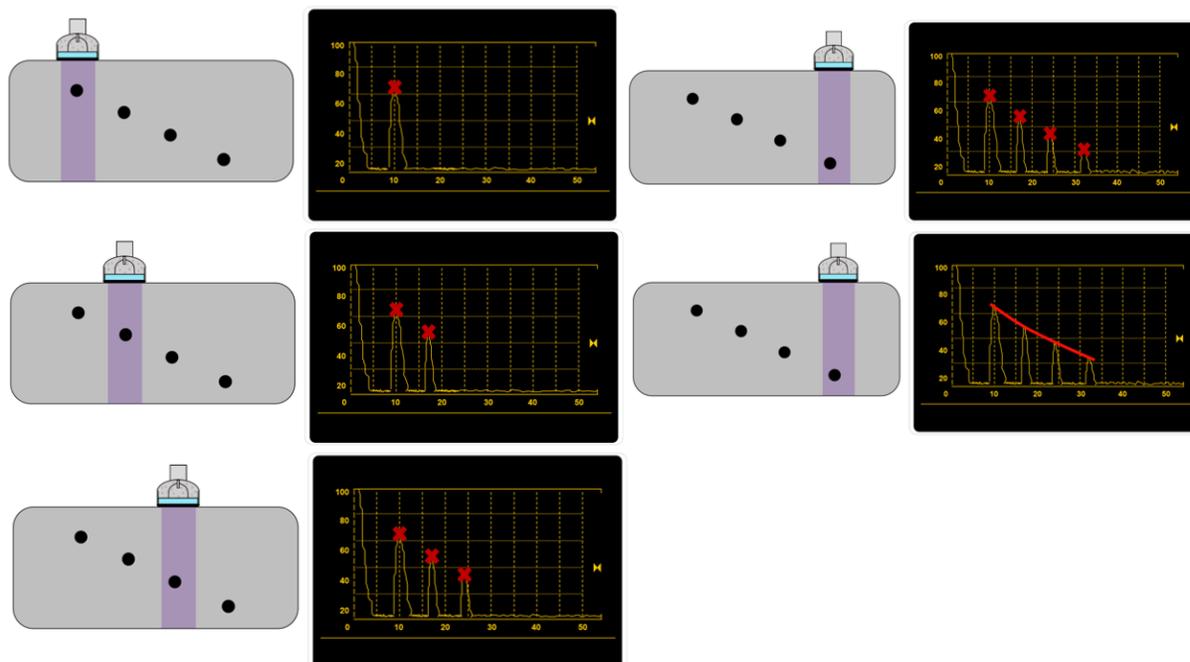


Figura 1.1.1.2 Construcción de la curva DAC.

Tal y como se aprecia en la figura anterior cada indicación generara una amplitud diferente a una profundidad diferente. Si se traza una línea con las amplitudes máximas de cada indicación se generará la curva DAC.

De manera general se puede establecer el siguiente procedimiento:

1. Maximizar la indicación del reflector.
2. Ajustar la indicación a un 80% de altura de pantalla (± 5).
3. Marcar sobre la pantalla la posición del pico.
4. Repetir los pasos anteriores con cada indicación.
5. Se traza una línea por los puntos y así se genera la curva DAC.

Evidentemente hoy en día existen equipos que realizan la curva DAC de manera automatizada y no se requiere marcar la pantalla ni hacer el trazo como tal. Pero tradicionalmente se realizaba así hasta la modernización de los equipos de UT.

1.1.2 Técnica de la caída de los 6dB

La técnica de la caída de los 6dB consiste en la caracterización de la longitud de la discontinuidad.

Luego de obtener la máxima amplitud producto de una indicación se procede a desplazar el transductor hasta que debido a la discontinuidad se tenga una caída del 50% de la amplitud con respecto a su amplitud máxima. Si recordamos la relación entre amplitud y decibels tendremos que la caída del 50% es equivalente a una reducción de 6dB de la amplitud máxima.

En la siguiente figura se ilustra este fenómeno.

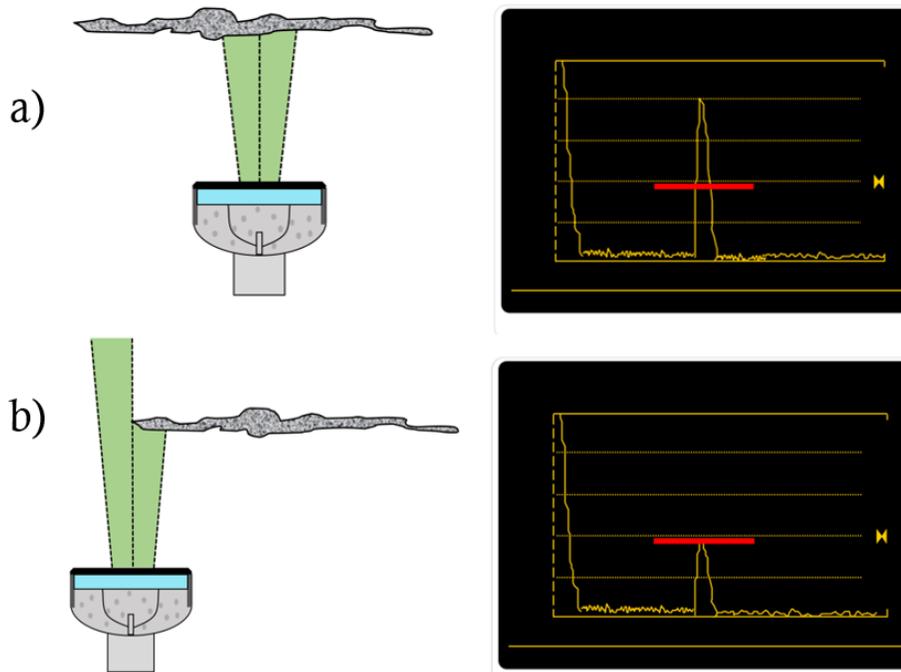


Figura 1.1.2.1 Técnica de la caída de los 6dB.

Tal y como se aprecia en la figura anterior apreciamos que la parte a de la figura se tiene una amplitud aproximada del 80% de altura de pantalla y al aproximarse al extremo de la discontinuidad la amplitud tiene una reducción del 50% de la señal.

La explicación teórica es muy sencilla y se puede observar en la parte b de la figura anterior. Lo que explica este fenómeno es el hecho de que el 50% de la onda ultrasónica no está impactando con la indicación y por lo tanto la cantidad de energía sonora que regresa al transductor se ve reducida en un 50%.

Este procedimiento se puede implementar en cualquier dirección y las cantidades que se deseen para permitir que la determinación de la discontinuidad sea la más precisa posible. Evidentemente, lo mejor será seguir el procedimiento de inspección.

Por otra parte, hay ciertas consideraciones que hay que tomar en cuenta a la hora de implementar la caída de los 6dB pero el factor principal es la morfología de la indicación inspeccionada.

1.2 Método de evaluación por caída de amplitud

Este método de evaluación lo podemos definir bajo los siguientes puntos.

- ✓ Aplicable en la inspección de piezas con superficies paralelas, usando normalmente haz recto.
- ✓ Utilizada para determinar el contorno y extensión de una discontinuidad.
- ✓ La calibración en distancia se realiza empleando múltiplos de la reflexión de la pared posterior de la pieza evaluada, tomando una zona sana del material.
- ✓ El ajuste de sensibilidad se realiza colocando la primera reflexión de la pared posterior en una amplitud fija entre el 50% y 75% de la escala vertical de la pantalla. Tomando una zona sana de la pieza.
- ✓ Se implementará la técnica de la caída de los 6dB.
- ✓ Normalmente se implementa en la inspección de placas y piezas forjadas.