

# ***MANUAL ULTRASONIDO INDUSTRIAL***



***MANUAL***  
***ULTRASONIDO***  
***INDUSTRIAL***

# ÍNDICE.

## CAPITULO I.

### 1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Definición de ultrasonido.....	1
1.2. Historia de la inspección por ultrasonido.....	1
1.3. Aplicaciones del ultrasonido.....	5
1.4. Revisión de matemáticas básicas.....	7
1.5. Responsabilidades de los niveles de certificación.....	8

## CAPITULO II.

### 2. PRINCIPIOS BÁSICOS DE ACÚSTICA.

2.1. Naturaleza de las ondas de sonido.....	9
2.1.1. Infrasónica.....	9
2.1.2. Sónica.....	9
2.1.3. Ultrasónica.....	9
2.2. El sonido.....	10
2.2.1. Cualidades del sonido.....	10
2.2.1.1. Intensidad.....	11
2.2.1.2. Tono.....	11
2.2.1.3. Timbre.....	11
2.3. Características de una onda sonora.....	11
2.3.1. Oscilación.....	12
2.3.2. Período.....	12
2.3.3. Frecuencia.....	13
2.3.4. Amplitud.....	14
2.3.5. Longitud de onda.....	14
2.3.6. Velocidad de propagación o velocidad acústica.....	14
2.3.6.1. Módulo de elasticidad.....	14
2.3.6.2. Módulo de corte.....	14
2.3.6.3. Coeficiente de Poisson.....	15
2.3.6.4. Densidad.....	15
2.4. Generación del ultrasonido.....	17
2.4.1. Piezoelectricidad. ....	17
2.4.2. Electrostricción.....	19
2.4.3. Magnetostricción.....	21
2.4.4. Construcción de cristales.....	23
2.4.5. Materiales piezoeléctricos.....	24
2.5. El palpador.....	25
2.5.1. Componentes de un palpador.....	26
2.5.2. Clasificación de los palpadores.....	27
2.5.2.1. El grado de amortiguamiento del transductor.....	27
2.5.2.1.1. Palpador de banda ancha.....	27
2.5.2.1.2. Palpador de banda angosta.....	27
2.5.2.2. La forma de propagación del haz.....	28
2.5.2.2.1. Palpador de incidencia normal o de haz recto.....	28
2.5.2.2.2. Palpador de incidencia angular.....	29
2.5.2.2.2.1. Tipos de palpadores angulares.....	29
2.5.2.3. Clasificación de los palpadores en base al método de inspección.....	29
2.5.2.3.1. Palpador de contacto.....	30
2.5.2.3.2. Palpador de inmersión.....	30

2.5.2.4. Clasificación de los palpadores en base al número de cristales piezoeléctricos.....	31
2.5.2.4.1. Palpador normal de cristal único (tipo E+R).....	31
2.5.2.4.2. Palpador dúplex o doble cristal (Tipo E-R).....	32
2.5.2.4.3. Palpador de cristal múltiple (de brocha o de mosaico).....	33
2.5.2.5. Clasificación de los palpadores por aplicaciones especiales.....	34
2.5.2.5.1. Palpadores especiales.....	34
2.5.2.5.2. Palpador con transductor libre.....	34
2.5.2.5.3. Palpador superamortiguado.....	35
2.5.2.5.4. Palpador con línea de retardo.....	35
2.5.2.5.5. Palpador puntual.....	35
2.5.2.5.6. Palpador de alta temperatura.....	36
2.5.2.5.7. Palpador focalizado.....	36
2.5.3. Características de los palpadores.....	37
2.5.3.1. Resolución.....	38
2.5.3.2. Sensibilidad.....	38
2.5.4. Selección de palpadores.....	38
2.5.5. Efectos Fresnel y Fraunhofer.....	39
2.5.5.1. Descripción del comportamiento del haz ultrasónico.....	39
2.5.5.1.1. Campo o zona muerta.....	40
2.5.5.1.2. Campo cercano o zona de Fresnel.....	41
2.5.5.1.3. Campo lejano o zona de Fraunhofer.....	43
2.5.5.1.3.1. Divergencia del haz.....	43
2.5.5.2. Atenuación de las ondas de sonido.....	43
2.5.5.2.1. Dispersión.....	44
2.5.5.2.2. Absorción.....	44
2.5.6. Ley de la atenuación (medición de la atenuación).....	45
2.5.7. Modos o tipos de ondas.....	47
2.5.7.1. Ondas longitudinales o de compresión.....	47
2.5.7.2. Ondas transversales o de corte.....	48
2.5.7.3. Ondas de superficie o de Rayleigh.....	48
2.5.7.4. Ondas de placa o de Lamb.....	49
2.5.8. Transferencia de energía de un medio a otro.....	49
2.5.8.1. Impedancia acústica.....	50
2.5.9. Comportamiento de las ondas ultrasónicas en superficies límites.....	51
2.5.9.1. Reflexión.....	53
2.5.9.2. Refracción.....	54
2.5.9.3. Conversión de modo.....	55
2.5.9.4. Ley de Snell.....	56
2.5.9.5. Ángulos críticos.....	57
2.5.9.5.1. Primer ángulo crítico.....	57
2.5.9.5.2. Segundo ángulo crítico.....	58
2.5.9.6. Dispersión, difracción, interferencia.....	59

### **CAPITULO III.**

#### **3. EQUIPOS.**

3.1. Instrumentación básica pulso – eco.....	60
3.1.1. Equipo electrónico de ultrasonido.....	60
3.1.1.1. Resonancia.....	61
3.1.1.2. Transmisión.....	62
3.1.1.3. Pulso-eco.....	64
3.1.1.4. Circuitos electrónicos.....	66

3.1.1.4.1. Suministrador de energía.....	66
3.1.1.4.2. Circuito de reloj o contador de tiempo.....	66
3.1.1.4.2.1. Intervalo de reloj.....	67
3.1.1.4.2.2. Tubo de rayos catódicos (Tubo de Braun).....	68
3.1.1.4.2.2.1. Placas deflectoras.....	69
3.1.1.5. Generador de barrido.....	69
3.1.1.6. Circuito transmisor generador de pulsos.....	70
3.1.1.7. Circuito receptor.....	71
3.1.1.8. Función de los controles.....	72
3.1.1.8. 1. Equipo USK7S de la Krautkramer.....	72
3.1.1.8.2. Equipo para medición de espesores por ultrasonido DMS de la marca Krautkramer.....	75
3.2. Cable coaxial y terminales.....	78
3.3. Presentación de Datos.....	79
3.3.1. Presentación A-scan.....	79
3.3.2. Presentación B-scan.....	80
3.3.3. Presentación C-scan.....	80
3.4. Otros equipos y sistemas.....	81
3.5. Acoplantes.....	81
3.5.1. Efecto del medio de acoplamiento.....	82
3.5.1.1. Tipos de acoplantes.....	82
3.5.1.2. Selección del acoplante.....	82
3.5.1.2.1. Acoplantes para contacto directo.....	83
3.5.1.2.2. Acoplantes para inmersión.....	84
3.5.2. Efecto de la condición y del acabado superficial.....	84
3.5.2.1. Efecto de la condición superficial.....	84
3.5.2.2. Efecto del acabado superficial.....	84
3.5.3. Efecto de la curvatura superficial.....	86
3.5.3.1. Incidencia normal.....	88
3.5.3.2. Incidencia angular.....	89
3.6. Calibración.....	89
3.6.1. Calibración básica del instrumento.....	89
3.6.1.1. Calibración con haz recto.....	89
3.6.1.1.1. Inspección con haz recto.....	93
3.6.1.1.2. Detección de discontinuidades.....	95
3.6.1.1.2.1. Variables de la pieza inspeccionada.....	95
3.6.1.1.2.2. Variables de la discontinuidad.....	96
3.6.1.2. Calibración con haz angular.....	98
3.6.1.2.1. Inspección con haz angular.....	101
3.7. Bloques de calibración (tipos y uso).....	103
3.7.1. Set de bloques ALCOA Serie A.....	104
3.7.2. Set de bloques ALCOA Serie B.....	104
3.7.3. Set de bloques ASTM E-127.....	105
3.7.4. Bloques de calibración I.I.W.....	106
3.7.4.1. Bloque de calibración I.I.W. V-1.....	106
3.7.4.2. Bloque miniatura.....	107
3.7.4.3. Bloque de calibración I.I.W. para calibración en resolución.....	108
3.7.4.4. Bloques especiales.....	108
3.8. Calibración según API 5L.....	108
3.9. Calibración según ASME.....	110
3.10. Bloque escalonado.....	111
3.11. Aplicación de los bloques calibración.....	111
3.11.1. Aplicación del set de bloques ALCOA Serie A.....	112

3.11.2. Aplicación del set de bloques ALCOA Serie B.....	113
3.11.3. Aplicación del set de bloques ASTM E-127.....	114
3.11.4. Aplicación de los bloques de calibración I.I.W.....	114
3.11.4.1. Aplicación del bloque de calibración I.I.W. V-1.....	114
3.11.4.2. Aplicación del bloque de calibración I.I.W. V-2.....	117
3.11.4.3. Aplicación del bloque de calibración I.I.W. para calibración en resolución .....	119
3.11.4.4. Aplicación de los bloques especiales.....	119
3.11.5. Aplicación del bloque de calibración ASME.....	120
3.11.6. Aplicación del bloque escalonado.....	121

## **CAPITULO IV.**

### **4. MÉTODOS BÁSICOS DE ENSAYOS.**

4.1 Contacto directo.....	123
4.1.1. Técnica de haz normal.....	123
4.1.2. Técnica de haz angular.....	124
4.1.3. Técnica de haz superficial.....	126
4.1.4. Ventajas del método de contacto directo.....	127
4.1.5. Limitaciones del método de contacto directo.....	127
4.2. Inmersión.....	127
4.2.1. Técnica de haz normal.....	128
4.2.2. Técnica de haz angular.....	129
4.2.3. Ventajas del método de inmersión.....	131
4.2.4. Limitaciones del método de inmersión.....	131
4.2.5. Sistema de inmersión en tanque.....	131
4.2.6. Sistema de chorro de agua.....	132
4.2.7. Sistema de rueda.....	133

## **CAPITULO V.**

### **5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS.**

5.1. Cálculo de la distancia superficial y recorrido del haz angular en superficies planas.....	134
5.2. Cálculo de profundidad del defecto.....	134
5.3. Aplicación de la técnica del haz angular en superficies curvas por el método de contacto directo e inmersión.....	135
5.4. Aplicación del método de contacto en superficies curvas.....	136
5.5. Aplicación del método de inmersión en superficies curvas.....	138

Glosario.....	139
---------------	-----

Anexos.....	141
-------------	-----

## 1. INTRODUCCIÓN.

### 1.1. Definición de ultrasonido.

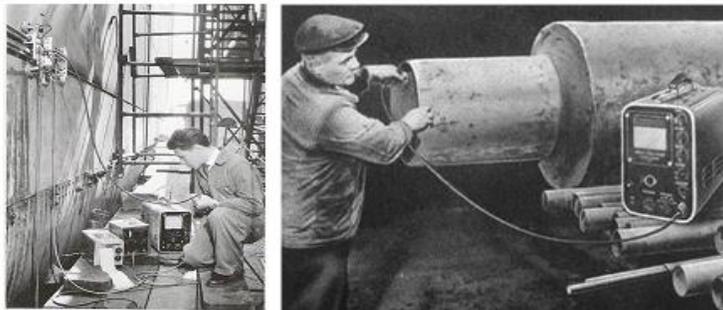
Los ultrasonidos son ondas acústicas de idénticas naturalezas que las ondas sónicas diferenciándose de estas en que su campo de frecuencia se encuentra por encima de la zona audible.

Son ondas mecánicas (perturbaciones) de alta frecuencia, que se propagan a través de los materiales y que son reflejadas al encontrar cambios (discontinuidades o interfaces) en las propiedades elásticas de los materiales.

### 1.2. Historia de la inspección por ultrasonido.

Antes de la segunda guerra mundial, el sonar, la técnica de enviar ondas acústicas a través del agua y de observar el retorno de los ecos para identificar los objetos sumergidos, inspiró a los investigadores del ultrasonido para explorar maneras de aplicar el concepto a la diagnosis médica.

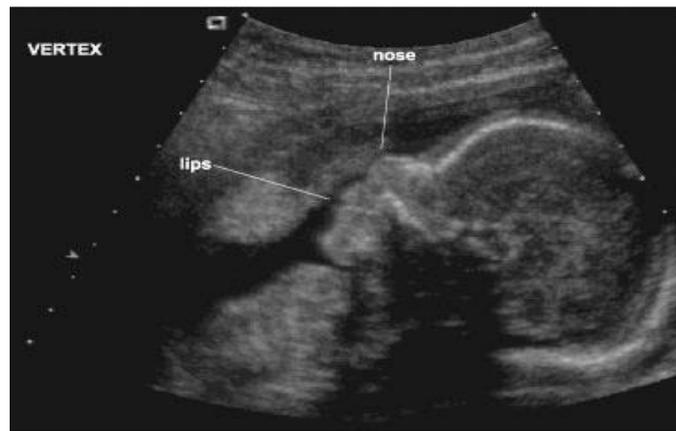
En 1928 un científico soviético de nombre Sergei Y. Sokolov presentó una técnica de transmisión de ondas ultrasónicas a través del material, para la detección de discontinuidades en los metales. Mulhauser, en 1931, obtuvo una patente para utilizar ondas ultrasónicas, usando dos transductores para detectar defectos en sólidos. Los equipos detectores de fallas fueron originalmente desarrollados, basándose en el principio de la intercepción de la energía ultrasónica por discontinuidades grandes, durante el paso del haz ultrasónico. Posteriormente, esta técnica recibió el nombre de inspección por transmisión. Este sistema de inspección presentaba ciertas limitaciones, principalmente, la necesidad del acceso en ambas superficies de la pieza inspeccionada para colocar un transductor en cada superficie. No se encontró un método práctico de inspección hasta que el Dr. Floyd Firestone (1940) y Simons (1945) desarrollaron la prueba ultrasónica pulsada, usando una técnica de pulso-eco. Inventaron un aparato empleando haces de ondas ultrasónicas pulsadas para obtener reflexiones de defectos pequeños, conocido como "Reflectoscopio Supersónico". En el mismo periodo en Inglaterra, Sproule desarrolló equipos de inspección ultrasónica en forma independiente.



**FIGURA 1.** Reflectoscopio supersónico.

Poco después del término de la segunda guerra mundial, los investigadores en Japón comenzaron a explorar las capacidades del diagnóstico médico del ultrasonido. El trabajo de Japón en ultrasonido era relativamente desconocido en los Estados Unidos y Europa hasta los años 50. Los investigadores entonces presentaron sus resultados en el uso del ultrasonido para detectar los cálculos biliares, las masas del pecho y los tumores, a la comunidad médica internacional.

Japón fue también el primer país en aplicar el ultrasonido de Doppler, un uso del ultrasonido que detecta objetos móviles internos tales como sangre que circula a través del corazón para la investigación cardiovascular.



**FIGURA 2.** Ultrasonido médico.

El desarrollo de la inspección ultrasónica en la industria creció de manera muy rápida por los requerimientos de la industria bélica. Al principio el propósito principal era la detección de discontinuidades en un material. La detección de tales discontinuidades, eran una causa para el retiro del componente en servicio.

A principios de los años 70, ocurrieron dos acontecimientos que provocaron un cambio importante en el campo de las PND (Pruebas No Destructivas). Primero, las mejoras en la tecnología aumentaron la capacidad de detectar discontinuidades pequeñas, lo cual hizo que más piezas fueran rechazadas aún cuando la probabilidad de falla del componente no había cambiado. Sin embargo, surgió la disciplina de la Mecánica de la Fractura, lo cual permitió predecir si una grieta de un tamaño dado fallaría bajo alguna carga particular, cuando se conocen las características de un material. Otras leyes fueron desarrolladas para predecir el índice de crecimiento de grietas bajo carga cíclica (fatiga). Con el advenimiento de estas herramientas, llegó a ser posible aceptar las estructuras que contenían discontinuidades, si los tamaños de éstas se conocían. Esto formó la base para la nueva filosofía del diseño “tolerante de daños”. Los componentes que tenían discontinuidades conocidas podrían continuar en servicio mientras se establecía que esas discontinuidades no crecerían a un tamaño crítico, produciendo la falla.

Se presentó entonces un nuevo desafío a la comunidad que desarrollaba ensayos no destructivos. La detección no era suficiente. Se necesitaba obtener también información cuantitativa sobre el tamaño de la discontinuidad para utilizarlas como datos en las predicciones de fracturas mecánicas. La necesidad de la información cuantitativa estaba particularmente en las industrias de la defensa y de energía atómica, lo cual condujo a la aparición de la Evaluación No Destructiva Cuantitativa (ENDC) como nueva disciplina de la ingeniería de la investigación.

Se iniciaron un sin número de programas de investigación alrededor del mundo, por ejemplo en el Centro para la Evaluación No Destructiva en la Universidad del Estado de Iowa (que crece como un esfuerzo importante de la investigación en el Centro Internacional de la Ciencia de Rockwell); el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica en Charlotte, Carolina del Norte; el Instituto de Fraunhofer para Pruebas No Destructivas en Sarrebruck, Alemania; y el Centro de Pruebas no Destructivas en Harwell, Inglaterra. El ensayo por ultrasonido (UT) se ha practicado por muchas décadas. Los progresos rápidos en la instrumentación, estimulada por los avances tecnológicos a partir de los años 50 aún continúan.

Desde los años 80 hasta el presente, las computadoras han proveído a los técnicos con instrumentos más pequeños, de uso rudo y con mayores capacidades. La calibración de espesores es un ejemplo del uso donde los instrumentos se han refinado; realizan la recopilación de datos más fácilmente y de mejor manera. Las capacidades incorporadas del registro de datos permiten que los millares de medidas sean registrados y eliminan la necesidad de hacer un registro manual. Algunos instrumentos tienen la capacidad para capturar formas de onda así como lecturas del espesor. La opción de la forma de onda permite que un operador vea o revise la señal en presentación A-Scan, de la medida del espesor al término de una inspección. Esto ha conducido a medidas, en el campo, más exactas y más repetibles. Muchos detectores de fallas ultrasónicas tienen una función trigonométrica que permite la determinación rápida y exacta de la localización de discontinuidades, al realizar inspecciones con ondas de corte. Las pantallas se pueden ajustar según el brillo, contraste, y en algunos instrumentos incluso el color de la pantalla y de la señal. Los transductores se pueden programar con los ajustes predeterminados del instrumento. El operador tiene que conectar solamente el transductor y el instrumento fijará variables tales como la frecuencia.



**FIGURA 3.** Evolución de los equipos ultrasónicos.

Ultrasonido por Arreglo de Fases. Fue en 1801 cuando el científico inglés Thomas Young demostró la interacción constructiva y destructiva de las ondas mecánicas, con la ayuda de un experimento que utilizaba dos fuentes puntuales de luz para crear patrones de interferencia. Las ondas que se combinaban en fase se reforzaban una a la otra, mientras las ondas que se combinaban de manera desfasada se eliminaban una a la otra.

El desfaseamiento es una forma de controlar estas interacciones, a través del retardo de los frentes de ondas, los cuales se originan desde dos o más fuentes. Se descubrió que este fenómeno se puede utilizar para direccionar y focalizar la energía de un frente de onda. En la década de los 60 los investigadores comenzaron a desarrollar los sistemas de Ultrasonido por Arreglo de Fases que utilizaban transductores con múltiples fuentes puntuales, que eran excitados, de tal manera, que podían controlar los patrones de interferencia del frente de onda.

A principios de este siglo XXI el desarrollo y aplicación del ultrasonido por arreglo de fases, como una tecnología única ha alcanzado un estado de madurez. La tecnología de ultrasonido por arreglo de fases cambió del campo médico al sector industrial al principio de la década de los 80. A mediados de esta década los materiales piezocompuestos fueron desarrollados y estuvieron disponibles a la orden de la manufactura de transductores para arreglo de fases de conformado complejo. Para el comienzo de la década de los 90, la tecnología por arreglo de ases fue incorporada como un nuevo método de NDE (Evaluación No Destructiva, por sus siglas en inglés) en los manuales de ultrasonido y manuales de capacitación para ingenieros. La mayoría de las aplicaciones desde 1985 a 1992 estuvieron relacionadas a la inspección en navíos nucleares (inyectores), grandes ejes forjados y componentes de turbinas de baja presión.

Nuevos avances en la tecnología de materiales piezocompuestos, micro maquinaria, microelectrónica y poder computacional (incluyendo paquetes de simulación para el diseño de transductores e interacción con los componentes del haz), todos contribuyeron al desarrollo revolucionario de la tecnología de arreglo de fases para el final de la década de los 90. La tecnología de arreglo de fases se ha estado desarrollando en estos años, y representa el futuro próximo en la aplicación del ultrasonido industrial por su versatilidad y facilidad en la interpretación de resultados.



**FIGURA 4.** Equipo de ultrasonido con arreglo de fase

### 1.3. Aplicaciones del ultrasonido.

Por los fenómenos que provocan en su propagación en los sólidos, líquidos y gases y debido fundamentalmente, al desarrollo de los sistemas de generación de vibraciones ultrasónicas, han dado lugar a numerosas aplicaciones técnicas y científicas.

Para dar una idea de esta gran diversidad de aplicaciones de los ultrasonidos, relacionamos a continuación, primeramente, algunas aplicaciones ajenas al control de calidad de los materiales estructurales y a los procesos industriales:

- **Biología:** Pregerminación de semillas y homogenización de la leche.
- **Comunicaciones:** Señales submarinas y otros sistemas de mensajes.
- **Fotografía:** Preparación de emulsiones.
- **Química:** Aceleración de reacciones y floculación.
- **Medicina:** “Diagnosis”, exploraciones en el cuerpo humano. “Terapéuticas”, producción de hormonas. y “antígenos”, cirugía y odontología.
- **Navegación y pesca:** Ayuda en la navegación marina y sondas de profundidad, detección de bancos de peces.
- **Industria química:** Aceleración del envejecimiento de la industria vinícola, preparación de coloides y desgasificación de líquidos.
- **Ensayos de laboratorios:** Efectos estroboscópicos, estudios sobre la difracción de la luz, sobre la velocidad del sonido y sobre el calor.

Entre las aplicaciones a los procesos industriales y al control de la calidad de los materiales estructurales cabe destacar las siguientes:

- **Proceso de colada y solidificación:** Afino de grano, aceleración en la solubilización, emulsificación y formación de nuevas fases, desgasificación.
- **Tratamiento térmico:** Aceleración de difusión, estabilización de los estados altrópicos.
- **Pulvimetalurgia:** Obtención de estados metálicos finalmente divididos.
- **Tratamientos superficiales:** Agitación y activación de los baños de electroplaqueados.
- **Proceso de limpieza y depuración:** Aceleración de la limpieza floculación del humo.
- **Procesos de soldadura:** En sustitución del fundente.
- **Mecanizado:** Activación del proceso abrasivo y perforación.
- **Ensayos y medidas de laboratorios:** Aceleración de los ensayos de fatiga.

- **Control de la calidad de los materiales estructurales:** Detección de heterogeneidades (defectología), determinación de sus propiedades (caracterización) y medidas de espesores (metrología).

Todas estas aplicaciones se pueden agrupar en dos áreas: En primer lugar; las que conciernen a la explotación de la energía acústica, es decir, en las que dicha energía se emplea primordialmente para actuar en un material dado y en segundo lugar; en las que la energía acústica se utiliza sólo en el grado requerido para transmitir una señal suficientemente clara, es decir, para poner de manifiesto su condición física o geométrica.

En el primer caso, la energía acústica se emplea como hemos visto, en la aceleración o provocación de fenómenos biológicos o químicos, en procesos industriales o como acciones terapéuticas en medicina.

En el segundo caso, la transmisión de una señal acústica se utiliza en comunicaciones, en exploraciones submarinas, para diagnosis en medicina y en el **control de la calidad de los materiales estructurales**.

Ateniéndonos a esta última aplicación, el hecho de emplear ultrasonidos (ondas acústicas cuya frecuencia se encuentra por encima de la zona audible) para la detección de heterogeneidades y medidas de espesores en los materiales, obedece a obtener por una parte, una marcada direccionalidad del haz acústico para mejor localización de dichas heterogeneidades ó precisión de medidas y, por otra parte, para lograr un alto grado de poder de resolución, es decir, de sensibilidad de detección de heterogeneidades pequeñas ó de medidas de espesores finos.

Ahora bien según veremos más adelante, los ultrasonidos sufren una atenuación en su propagación en los materiales, atenuación que aumenta con la frecuencia de vibración. Esto impone un límite superior a la frecuencia empleada para la detección de heterogeneidades y medidas de espesores en los materiales. Pero por otra parte, este fenómeno de atenuación función de las características del material, se aprovecha para la determinación de las propiedades en los materiales. En el caso de caracterización de los materiales, el espectro de frecuencias empleadas es mucho más amplio, prácticamente desde las frecuencias infrasónicas hasta las frecuencias ultrasónicas más altas logradas hasta el presente, aprovechándose prácticamente la totalidad del espectro acústico técnicamente disponible.

#### ***Ventajas:***

1. La prueba se efectúa más rápidamente que empleando la técnica de Radiografía.
2. Alto poder de penetración, lo cual permite detectar discontinuidades profundas en piezas de varios metros de longitud.
3. Se puede realizar el ensayo teniendo acceso por solo una de las superficies del componente.
4. Alta sensibilidad, que permite detectar discontinuidades extremadamente pequeñas.

5. Mayor precisión que otros ensayos no destructivos, ya que permite determinar la posición, tamaño, orientación, forma y naturaleza de las discontinuidades.
6. Normalmente la interpretación de las indicaciones se hace de forma inmediata.
7. Se puede aplicar en cualquier tipo de materiales.
8. No resulta peligrosa su operación para el personal y no tiene ningún efecto adverso sobre el equipo y materiales circundantes.
9. No requiere de condiciones especiales de seguridad como el caso de la Radiografía.
10. Es portátil.

***Desventajas:***

1. Baja velocidad de inspección cuando se emplean métodos manuales.
2. Requiere de personal técnico con mucha experiencia para la interpretación y evaluación de resultados.
3. Las piezas que son rugosas, de formas irregulares, muy pequeñas o delgadas, son difíciles de ensayar.
4. Dificultad para detectar o evaluar las discontinuidades cercanas a la superficie sobre la que se introduce el ultrasonido.
5. Es afectado por las características estructurales del material, por ejemplo el tamaño de grano y el tipo de material a ser inspeccionado.
6. Se requiere el empleo de bloques estandarizados para la calibración del sistema y para la descripción de la discontinuidad.
7. No se obtiene una imagen permanente de las discontinuidades, salvo que se adapten a otros equipos computarizados que almacenen información y estos a su vez a graficadores o equipos de video grabación.
8. Se requiere de información suficiente sobre la pieza o componente a ensayar para la correcta interpretación de los resultados.
9. Alto costo del equipo.
10. . Se requiere de agentes acoplantes.

**1.4. Revisión de matemáticas básicas.**

Dentro del contenido de este manual, para el pleno entendimiento y desarrollo, se estarán realizando diferentes cálculos matemáticos indispensables tales como; trigonometría, conversión de unidades, despejes, entre otros.

### **1.5. Responsabilidades de los niveles de certificación.**

Es necesario que el personal responsable de llevar a cabo los ensayos, esté entrenado y altamente calificado, comprendiendo a cabalidad todo lo concerniente a equipos, técnicas, materiales y procedimientos de ensayo, de acuerdo a los siguientes niveles de calificación:

***Nivel I:*** El personal con calificación "Nivel I" debería estar calificado para llevar a cabo calibraciones específicas adecuadamente del equipo de prueba, para realizar Pruebas No Destructivas (PND) específicas, y evaluaciones específicas para determinar la aceptación ó rechazo de acuerdo con instrucciones escritas de inspección aplicables, y para realizar el registro de resultados. El individuo Nivel I en PND debería recibir la instrucción necesaria o la supervisión de un individuo Nivel II o III certificado en PND.

**Nivel II:** El personal con calificación "Nivel II" debería estar calificado para efectuar el ajuste y calibración del equipo de prueba, para interpretar y evaluar resultados con respecto a códigos, normas y especificaciones. El Nivel II en PND debería estar completamente familiarizado con el alcance y limitaciones de los métodos de inspección en los cuales está calificado y debería ejercer la responsabilidad asignada para el entrenamiento en la práctica y para ser guía de los aprendices y del personal Nivel I en PND. El Nivel II en PND debería ser capaz de organizar y emitir reportes de resultados de las inspecciones realizadas por PND.

**Nivel III:** El personal con calificación "Nivel III" debería ser capaz de desarrollar, calificar y aprobar procedimientos, establecer y aprobar técnicas, interpretar códigos, normas, especificaciones y procedimientos de inspección; designar el método de PND particular, las técnicas y procedimientos que deberían ser utilizados. El Nivel III en PND debería ser responsable de las operaciones completas de las PND en las cuales está calificado y asignado y debería ser capaz de interpretar y evaluar los resultados obtenidos con base en códigos, normas y especificaciones aplicables. El Nivel III en PND debería tener suficiente respaldo práctico en materiales aplicables, tecnología de fabricación y productos para establecer técnicas y asistir en el establecimiento de criterios de aceptación cuando no estén disponibles. El Nivel III en PND debería tener familiaridad general con otros métodos de PND apropiados, como se demuestra en un examen Básico de NIVEL III ASNT o cualquier otro medio. El Nivel III en PND, en los métodos en los cuales está certificado, debería ser capaz de entrenar y examinar personal Nivel I y II en PND para su certificación en aquellos métodos.

## 2. PRINCIPIOS BÁSICOS DE ACÚSTICA.

### 2.1. Naturaleza de las ondas de sonido.

Ultrasonido es el nombre dado al estudio y aplicación de ondas sonoras con frecuencias superiores a las percibidas por el oído humano. Las ondas sonoras pueden ser divididas en tres grandes grupos:

**2.1.1. Infrasonica:** Donde el rango de frecuencias es menor a 16 ciclos por segundo ( $f < 16 \text{ Hz}$ ).

**2.1.2. Sónica:** Donde las frecuencias se encuentran entre 16 y 20.000 ciclos por segundo ( $16 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$ ).

**2.1.3. Ultrasónica:** Donde las frecuencias son mayores a 20.000 ciclos por segundo ( $f > 20 \text{ kHz}$ ) Sin embargo, la frecuencia más alta lograda hasta el presente, es del orden de 1.000.000.000 ciclos por segundo (1.000 MHz). *El rango de frecuencias usado en ultrasonido abarca desde los 200.000 hasta los 25.000.000 de ciclos por segundo (200 kHz hasta 25 MHz).*

El ultrasonido, como método de ensayo no destructivo, es el uso de ondas ultrasónicas para evaluar materiales sin modificar sus condiciones de servicio. El ensayo de ultrasonido puede ser usado para medir el espesor de materiales, o para examinar la estructura interna de piezas por posibles discontinuidades.

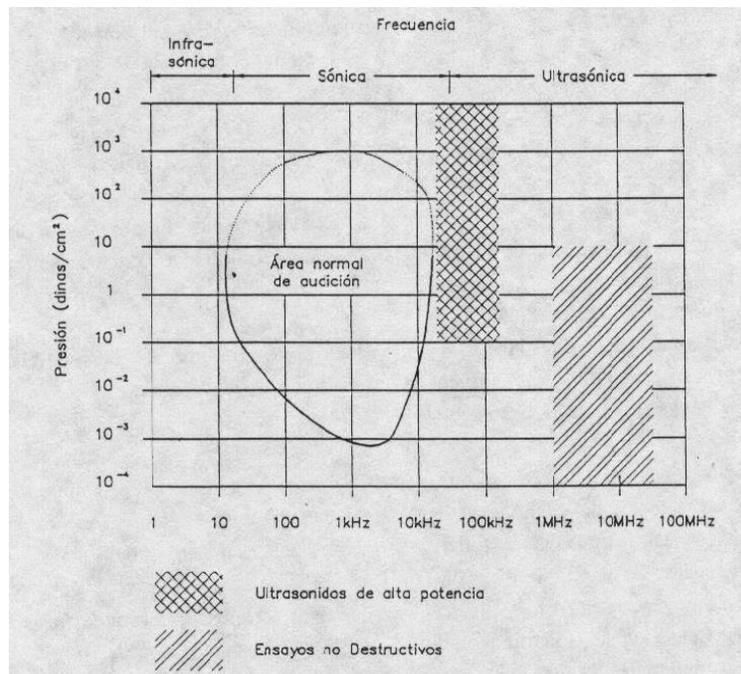
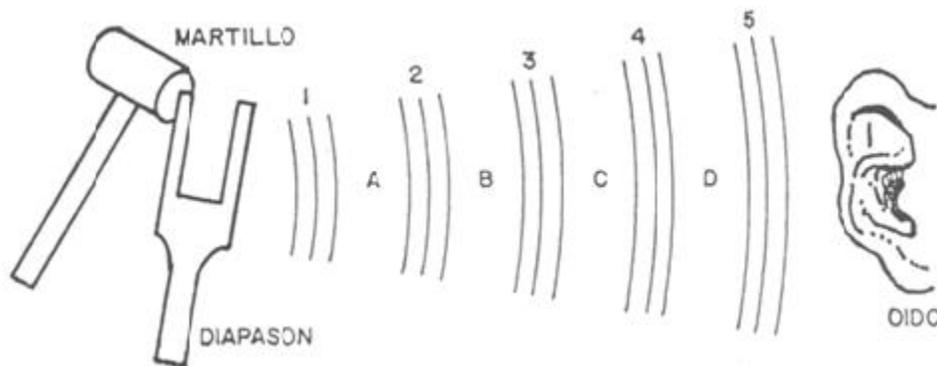


FIGURA 5. Espectro acústico.

## 2.2. El sonido.

Se define como la vibración mecánica de partículas en un medio. Cuando una onda sonora se transmite a través de un medio; las partículas vibran alrededor de un punto fijo, a la misma frecuencia que la onda sonora. Las partículas no se trasladan con la onda, sólo reaccionan ante la energía de la misma; esto implica que la energía de la onda es la que se transmite a través del material, por medio de sus partículas.

A continuación, tenemos un diapasón que es golpeado con un martillo. Por efecto del golpe se producirá un sonido, el cual escucharemos. Ahora, si observamos el diapasón en el momento de ser golpeado, veremos que, debido al impacto, comenzará a moverse atrás y adelante un movimiento alternativo. Por medio de un golpe, hemos transmitido energía al diapasón; ésta energía es transmitida, por acción del movimiento, a la capa de aire que se encuentra alrededor del diapasón, la que se comprimirá, ésta a su vez comprimirá a la capa inmediata, ésta comprimirá la siguiente y así sucesivamente. De la misma forma, con la transmisión de la vibración se crearán zonas de compresión y zonas de expansión. El resultado final, lo escucharemos; tal y como se muestra en la figura 6.



**FIGURA 6.** Sonido producido por un Diapasón.

Las áreas identificadas con los números "1", "3", "4" y "5", representan las zonas de compresión de la onda, y las identificadas con las letras "A", "B", "C", "D", representan las zonas de expansión de la onda, producto la vibración del diapasón. Entonces, el sonido será, la transmisión de una onda mecánica a través de un medio; la vibración mecánica de partícula en un medio. Para nuestros propósitos debemos comprender y recordar que la vibración es:

- Un movimiento alternativo.
- Energía en movimiento.

Sabemos que el sonido se transmite a través del aire y que puede ser reflejado en forma de ecos. Además, el sonido puede ser transmitido a través del agua, e igualmente reflejado, éste es el principio del sonar; "la detección de objetos bajo el agua". De la misma manera, el sonido puede ser transmitido a través de elementos sólidos. Los ensayos ultrasónicos utilizan tanto la transmisión del sonido a través de líquidos, como la transmisión del sonido a través de sólidos.

### **2.2.1. Cualidades del sonido.**

El sonido tiene tres cualidades importantes, que son:

- Intensidad.
- Tono.
- Timbre.

#### **2.2.1.1. Intensidad.**

La intensidad es la cualidad por la que percibimos un sonido fuerte o débil. El sonido será más intenso, cuanto mayor sea la energía de vibración de las partículas, y como se puede demostrar que dicha energía es proporcional al cuadrado de la amplitud; entonces, la intensidad de una onda sonora dependerá de la amplitud de la misma.

#### **2.2.1.2. Tono.**

El tono de un sonido, es la cualidad que nos lo hace percibir como agudo o grave, y depende de la cantidad de veces en un período de tiempo, en el cual se repite la vibración, o sea, la frecuencia.

#### **2.2.1.3. Timbre.**

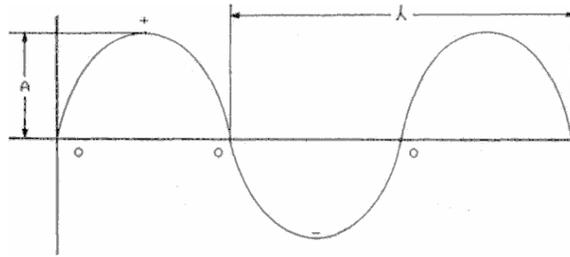
El timbre de un sonido, es la cualidad que nos permite distinguir un mismo tono, pero producido por dos instrumentos diferentes. Esto nos indica que el timbre de un sonido depende del medio que lo produzca.

Para obtener una mejor comprensión de los fenómenos que ocurren en el ensayo no destructivo por ultrasonido, es necesario recordar algunos conceptos físicos básicos.

### **2.3. Características de una onda sonora.**

Cuando hablamos de sonido, hablamos de vibración, un movimiento atrás y adelante; alternativo, o sea, se produce infinidad de veces pero de una forma ordenada. Cuando una partícula parte de un punto "O" y se desplaza hasta una posición máxima "+"; luego, se devuelve al punto "O", pero continúa su movimiento hacia atrás y logra otra posición de desplazamiento máximo "-"; y regresa al punto "O", ha

realizado un ciclo (ver figura 7). El concepto de ciclo está relacionado directamente con el período y la frecuencia.



**FIGURA 7.** Relación entre amplitud y longitud de onda.

Para entender claramente el funcionamiento de la inspección por ultrasonido, es necesario conocer las definiciones de algunos conceptos que caracterizan a las ondas y su interacción con la materia.

Una onda sonora está definida por cuatro características principales:

- Período.
- Frecuencia.
- Amplitud.
- Longitud de onda.

### 2.3.1. Oscilación.

Como punto de partida consideremos el término oscilación y todas sus características relacionadas. Un ejemplo bien conocido de oscilación son los péndulos ó las cuerdas de un instrumento musical, cuya característica común de oscilación en ellos es el cambio regular de su valor de estado (por ejemplo, posición de una partida de la masa) o el periódico alcance de una condición instantánea (en un péndulo, por ejemplo, el punto de inversión derecho ó izquierdo). Un péndulo puede moverse veloz ó lentamente, fuerte ó débilmente; dos péndulos idénticos pueden oscilar en el mismo sentido o no con otro.

**Oscilación (ciclos):** Cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo.

Los siguientes términos están relacionados con las vibraciones y serán abreviadamente definidos como sigue:

**2.3.2. Período (t):** Tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación, por ejemplo el tiempo en que un cuerpo se mueve un ciclo completo relacionado al momento de estados idénticos. Este se destina “*t*” y es usualmente expresado en segundos (**seg**).

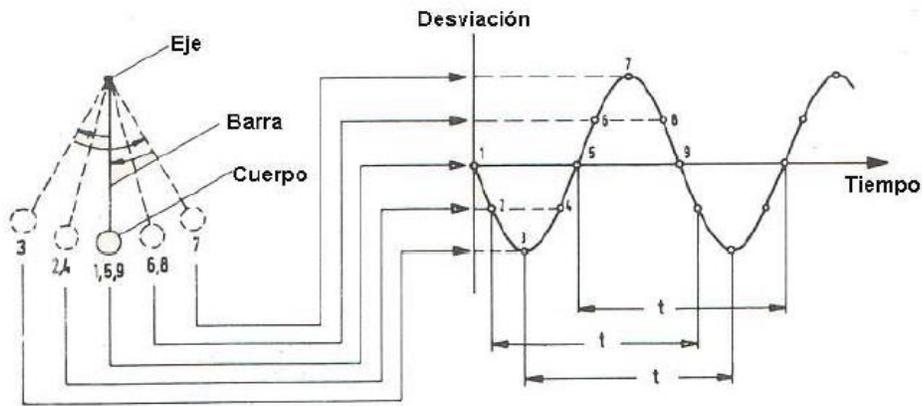


FIGURA 8. Oscilación de un péndulo (derecha) y su representación gráfica vs. El tiempo.

**2.3.3. Frecuencia ( $f$ ):** Es la inversa del periodo o el número de oscilaciones (ciclos) por unidad de tiempo. La frecuencia se designa con “ $f$ ” dando la relación:

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

La unidad es el “Hertz” (Hz).

1 Hertz (Hz)=1 ciclo por segundo

1 Kilohertz (KHz) =  $10^3$  Hz = 1.000 ciclos por segundo.

1 Megahertz (MHz) =  $10^6$  Hz = 1.000.000 ciclos por segundo.

1 Gigahertz (GHz) =  $10^9$  Hz = 1.000.000.000 ciclos por segundo.

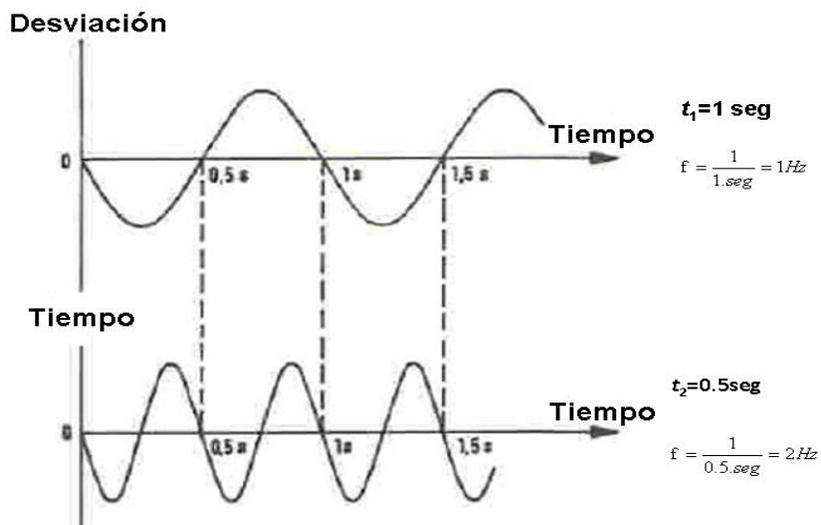
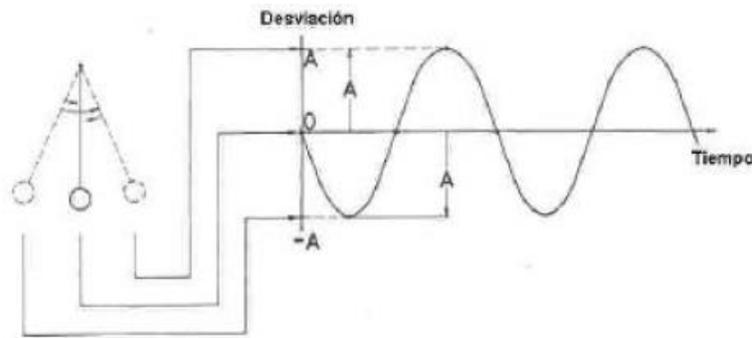


FIGURA 9. Ejemplos de oscilaciones con diferentes tiempos y frecuencias.

**2.3.4. Amplitud (A):** Es la máxima desviación del cuerpo oscilante desde la posición de equilibrio.



**FIGURA 10.** Definición de la Amplitud “A” de una oscilación.

**2.3.5. Longitud de onda ( $\lambda$ ):** Es la distancia ocupada por una onda completa y es igual a la distancia a través de la cual se mueve la onda por un periodo o ciclo.

Los parámetros de frecuencia ( $f$ ), velocidad acústica ( $v$ ) y longitud de onda ( $\lambda$ ) son útiles para describir la geometría del haz, las propiedades de los transductores, además de los modos de propagación y se interrelacionan por medio de la siguiente ecuación, la cual es válida para todos los tipos de onda:

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

En el caso particular de la aplicación del ultrasonido, la velocidad permanece constante, pues está determinada por la densidad y las constantes elásticas del material bajo ensayo.

**2.3.6. Velocidad de propagación o velocidad acústica (V):** Es la velocidad de transmisión de la energía sonora a través de un medio en la dirección de propagación.

Las velocidades de los diversos tipos de onda pueden ser calculadas a partir de las constantes elásticas del material de que se trate. Estas constantes son:

**2.3.6.1. Módulo de elasticidad (E):** Es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo de tracción o compresión ( $\sigma$ ) y la deformación unitaria ( $\epsilon$ ) experimentada por el material.

Este módulo está dado por la ecuación:

$$\sigma = E \times \epsilon$$

**2.3.6.2. Módulo de corte (G):** Es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo de corte ( $\tau$ ) y la deformación de corte unitaria ( $\gamma$ ) experimentada por el material, el cual está definido por:

$$\tau = G \times \gamma$$

**2.3.6.3. Coeficiente de Poisson ( $\mu$ ):** Es la relación (negativa) entre la deformación perpendicular ( $\epsilon_{ii}$ ) y paralela a la dirección de aplicación del esfuerzo ( $\epsilon_{ii}$ ), y se define mediante la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{\epsilon_{ii}}{\epsilon_{ii}}$$

**2.3.6.4. Densidad ( $\rho$ ):** Constante propia de cada material. Se define por la relación entre la masa ( $m$ ) y el volumen ( $V$ ), dada por la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Las fórmulas que proporcionan los valores de la velocidad de propagación para los distintos tipos de ondas son:

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

Ondas Transversales; 
$$V_t = \sqrt{\frac{E}{\rho * 2(1+\mu)}} = \frac{G}{\rho}$$

Ondas Superficiales; 
$$V_s = \frac{0.87 + 1.12}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{\rho * 2(1+\mu)}}$$

Entre las velocidades de las ondas longitudinales y transversales, así como entre las ondas transversales y superficiales, existen las siguientes relaciones:

$$V_t = V_L \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} \qquad V_s = V_t \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu}$$

En todos los materiales sólidos la relación de las velocidades longitudinal y transversal fluctúa entre 0 y 0.7. De acuerdo a esto, dado que el valor del *coeficiente de Poisson* para el acero es 0.28 y para el aluminio es 0.34, resulta que:

$$\frac{V_t}{V_L} = 0.53 \qquad \text{y} \qquad \frac{V_s}{V_t} = 0.92 \quad \text{en acero}$$

$$\frac{V_t}{V_L} = 0.49 \qquad \text{y} \qquad \frac{V_s}{V_t} = 0.93 \quad \text{en aluminio}$$

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de los diferentes cálculos relacionados a densidad, velocidad e impedancia acústica en diferentes materiales.

Densidades, Velocidades e impedancias acústicas de distintos materiales				
Material	Densidad 10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup> $\rho$	Velocidades Acústicas 10 <sup>3</sup> m/s		Impedancia Acústica 10 <sup>6</sup> Kg/m <sup>2</sup> *s $Z = \rho * VL$
		VL	Vt	
Acero (baja aleación)	7.85	5.83	3.19	45.7
Acero Inoxidable austenítico (18/B)	8.03	5.66	3.12	45.5
Acero Inoxidable martensítico 13% Cr	7.67	7.39	2.99	56.7
Aluminio	2.71	6.32	3.08	17.1
Aleación Al - Cu Al L 3120	2.78	6.25	3.10	17.4
Aleación Al - Cu Al L 3140	2.78	6.19	3.11	17.2
Fundición (hierro-carbón)	7.2	3.5-5.6	2.2-3.2	25-40
Hierro	7.7	5.85	3.23	45
Inconel (laminado)	8.25	7.82	3.02	64.5
Latón (Cu-Zn)	8.6	3.83	2.05	33
Metal duro (Widia)	11-15	6.8-7.3	4.0-4.7	75-110
Monel (laminado)	8.83	6.02	2.72	53.1
Níquel	8.9	5.63	2.96	50
Plomo 6% Antimonio	10.9	2.16	0.81	23.6
Cristales Piezoeléctricos				
Cuarzo (SiO <sub>2</sub> ) Corte X	2.65	5.76	---	15.3
Metaniobato de Plomo (PbNb <sub>2</sub> O)	5.8	2.8	---	16
Sulfato de Litio (Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	2.06	4.72	---	8.6
Titanato de Bario (BaTiO <sub>3</sub> )	5.7	4.40	---	11.2
Plexiglás	1.18	2.73	1.1	3.1
Teflón	2.2	1.35	---	3.0
Araldit	1.15-1.3	2.5-2.8	1.1	2.8-3.7
Baquelita	1.4	2.59	---	3.6
Aceite (SAE 20 a 30)	0.89-0.96	1.74	---	1.5-1.7
Agua Destilada	1.0	1.483	---	1.48
Glicerina	1.26	1.92	---	2.4
Alcohol etílico	0.79	1.17	---	0.92
Aire	0.0012	0.330	---	0.000398

**TABLA 1.** Densidad, velocidad e impedancia acústica en diferentes materiales.

## 2.4. Generación del ultrasonido.

El empleo del ultrasonido como método de ensayo no destructivo, envuelve la aplicación de técnicas especializadas y la utilización de diversos tipos de generadores y receptores. Con anterioridad, fueron presentadas las propiedades fundamentales del sonido. A continuación, se presentan los tipos básicos de palpadores y el principio físico de generación de las ondas.

Una parte vital en el sistema de ensayo por ultrasonido es el **transductor**. Por medio de éste, la energía eléctrica se convierte en energía mecánica (ondas sonoras) o viceversa. Opera debido al efecto piezoeléctrico, el cual consiste en que ciertos cristales cuando se tensionan, se polarizan eléctricamente y generan voltaje eléctrico entre las superficies opuestas. Esto es reversible en el sentido de que al aplicar un voltaje a través de las caras de un cristal, se produce deformación del mismo. Este efecto microscópico se origina por las propiedades de simetría de algunos cristales. Los cristales son átomos arreglados en un patrón tridimensional definido.

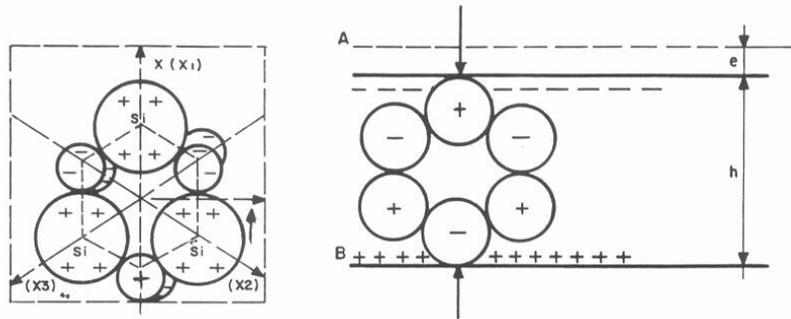
Existen 32 clases diferentes y 20 de éstas son piezoeléctricas, de las cuales 10 se polarizan espontáneamente. En el último caso, algunos de los materiales cambian su dirección de polarización cuando se les aplica un campo eléctrico y son llamados ferroeléctricos por analogía con los materiales ferromagnéticos que se magnetizan espontáneamente. La mayoría de los transductores usados en el ensayo por ultrasonido son del tipo ferroeléctrico y se conocen como cerámicos debido a que sus propiedades físicas y mecánicas son comparables a las del material del mismo nombre. Se emplean por su alta eficiencia en la conversión de la energía eléctrica en ondas ultrasónicas. La generación de ondas ultrasónicas puede realizarse por diversos medios o efectos físicos. Sin embargo, se describirán solo los principales. *La piezoelectricidad, la electrostricción y la magnetostricción.*

### 2.4.1. Piezoelectricidad.

Fue descubierta en 1880 por Pierre y Marie Curie, quienes demostraron que algunos materiales como el cuarzo, al ser sometidos a una presión mecánica externa, producen cargas eléctricas sobre su superficie. En 1881, Lippman descubrió el efecto contrario y predijo que al aplicar una corriente eléctrica al material se produce deformación mecánica. Como se puede observar, la piezoelectricidad puede ser un fenómeno reversible, por que al producir una deformación mecánica en un cristal, se producen cargas eléctricas sobre sus caras (efecto piezoeléctrico directo); por otra parte, si al cristal se le aplica una corriente eléctrica sobre sus caras, se producirá una deformación mecánica (efecto piezoeléctrico invertido).

Ambos efectos son proporcionales, ya sea con la cantidad de energía eléctrica o con la deformación aplicada. La piezoelectricidad puede explicarse fácilmente analizando un cristal de cuarzo a escala atómica, cuya estructura contiene iones cargados positivamente (átomos de silicio) e iones cargados negativamente (átomos de oxígeno) como se muestra en la figura 11. En su estado relajado el cristal es neutro, no lleva ninguna carga eléctrica sobre sus caras. Al aplicarle una fuerza mecánica ésta lo deforma

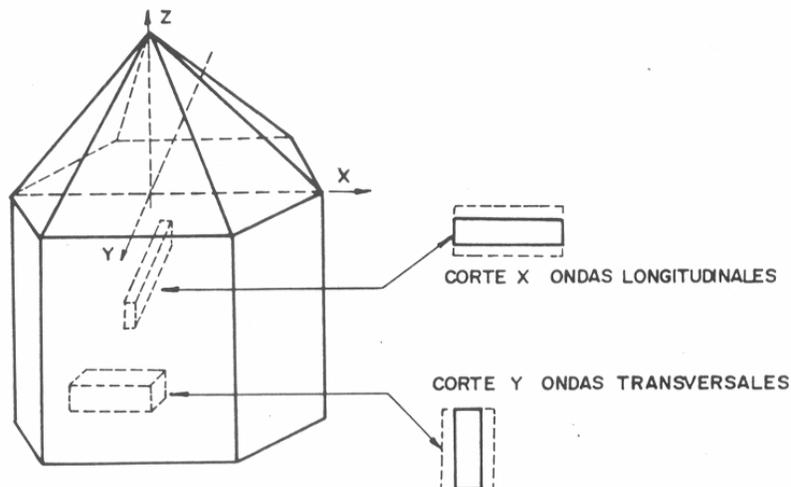
provocando que los iones positivos se aproximen entre sí, en tanto que los iones negativos se separan, y así el cristal queda cargado eléctricamente. El efecto inverso (los átomos de silicio se alejan), sucede cuando se hace pasar una corriente eléctrica a través del cristal.



**FIGURA 11.** Configuración de una molécula de cuarzo.

Como se puede apreciar en la figura 12, un cristal de cuarzo tiene tres clases de ejes. El eje que une los vértices de las pirámides es el “eje óptico” o eje Z del cristal; un eje X o eje eléctrico, que está definido por la línea que une dos vértices opuestos del hexágono, lo que implica la existencia de tres de estos ejes; y el tercer eje Y, llamado también “eje mecánico”, está definido por la perpendicular a los lados de dicho hexágono, habiendo por lo tanto, tres ejes Y. Al cortar la lámina en dirección perpendicular a uno de los ejes X o Y, se obtienen cristales piezoeléctricos que son denominados “cristales de corte X” o “cristales de corte Y” respectivamente.

La diferencia fundamental que existe entre estos dos cristales es que, mientras los cristales de corte X son generadores de ondas longitudinales, los cristales de corte Y son generadores de ondas transversales.



**FIGURA 12.** Cristales de cuarzo de corte X y corte Y.

Cuando a esta molécula se aplica una presión mecánica (acústica en este caso), en la dirección del eje X, los iones se desplazan dando lugar a la formación de un dipolo eléctrico, liberándose cargas eléctricas positivas y negativas en las superficies del cristal que son normales al eje del que han sido cortados. Este fenómeno es llamado “piezoeléctrico longitudinal directo”.

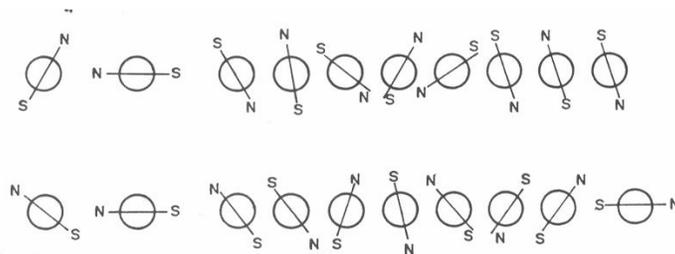
Si por el contrario, se ejerce la presión perpendicular al eje X, o lo que es igual, siguiendo la dirección del eje Y, se liberarán cargas eléctricas en las superficies del cristal con la polaridad opuesta el caso anterior, no apareciendo así cargas libres en las caras donde se aplica la presión, por lo que se denomina a este fenómeno “efecto piezoeléctrico transversal directo”. Si las caras del cristal se recubren con películas conductoras, se obtiene, por efecto de las variaciones de presión, una determinada tensión eléctrica. Este efecto piezoeléctrico directo es el que se utiliza en la “recepción” de las ondas ultrasónicas.

De tal forma, que al incidir una onda ultrasónica longitudinal, perpendicularmente sobre una lámina de cuarzo de corte X, está queda sometida a un esfuerzo dinámico de compresión – tracción, apareciendo como consecuencia de ello una tensión eléctrica alterna que el equipo de ultrasonido amplifica y registra. Lo mismo se puede decir de una lámina de cuarzo de corte Y, cuando sobre ella incide una onda ultrasónica transversal.

El efecto piezoeléctrico inverso se utiliza para la generación de ondas ultrasónicas. Si se somete una lámina de cuarzo, de corte x o de corte Y a una tensión eléctrica alterna entre las dos caras opuestas del cristal, se origina una vibración mecánica del mismo ritmo y en dirección longitudinal o transversal respectivamente. Resumiendo, una lámina de cuarzo convenientemente tallada, sometida a presiones mecánicas se polariza eléctricamente. El efecto inverso también se produce, es decir, una lámina de cuarzo sometida a un campo eléctrico cambia sus dimensiones.

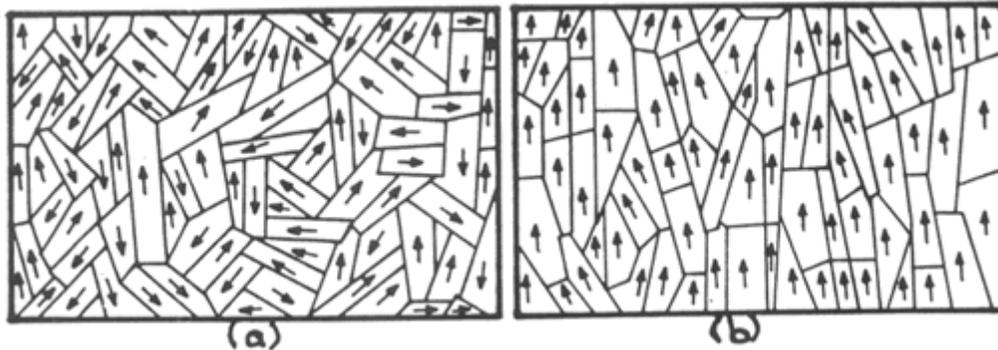
### 2.4.2. Electrostricción.

Para entender este efecto es necesario explicar que en los materiales piezoeléctricos y ferromagnéticos, los granos están divididos en dominios; o sea, regiones de material completamente magnetizados y separados por fronteras que poseen un campo eléctrico elemental llamado momento dipolar (ferroeléctricos), o un dominio magnético (ferromagnéticos). Un material que no esta magnetizado presenta sus átomos con momentos dipolares o dominios magnéticos con una orientación al azar.



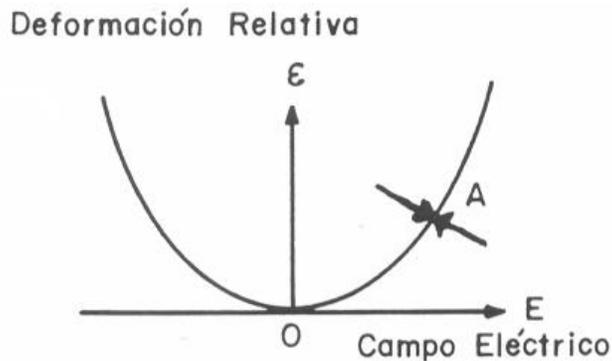
**FIGURA 13.** Distribución al azar de las moléculas o dominio magnético de un material no magnetizado.

Al generar un campo eléctrico sobre un material que presenta sus dominios orientados al azar, estos tienden a ordenarse en sentido del campo y así se provoca una deformación mecánica en el cristal (figura 14).



**FIGURA 14.** Fenómeno de electrostricción a) Dominio de una material al estado libre b) Influencia de un campo eléctrico.

La electrostricción presenta dos diferencias fundamentales con la piezoelectricidad. Una es la deformación relativa que no es proporcional al campo eléctrico. La otra es que siempre se produce una deformación, aún si se invierte la polaridad de la tensión aplicada (figura 15).

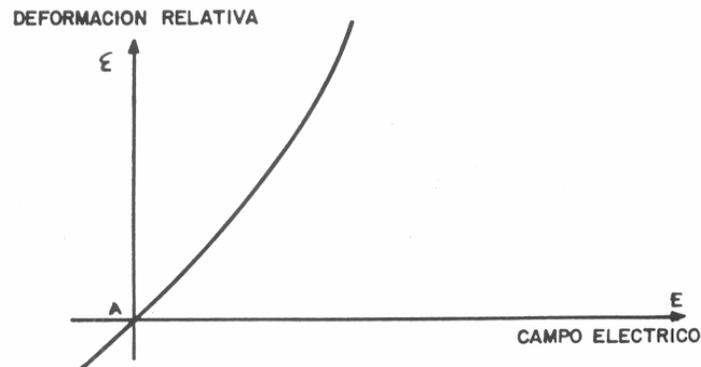


**FIGURA 15.** Deformación del Titanato de Bario por la aplicación de un campo eléctrico.

Para utilizar este efecto en la generación de ondas ultrasónicas, es necesario modificar la estructura de los materiales electrostrictivos y convertirlos en piezoeléctricos por cualquiera de los dos métodos siguientes:

- a) Aplicar corriente continua al cristal para orientar todos los dominios en una dirección.
- b) Calentar el material sobre su temperatura de Curie (arriba de la cual la estructura pierde sus propiedades ferroeléctricas) y aplicar un voltaje de aproximadamente de 100 Voltios por milímetro de espesor durante el enfriamiento para fijar los dominios en una orientación preferente. A estos materiales se les denomina

polarizados. Comparando las gráficas del material electrostrictivo (figura 15) y del polarizado (figura 16), se denota que el origen “O” se ha desplazado en “A” siendo ésta la parte útil de la curva, como se muestra en la figura.



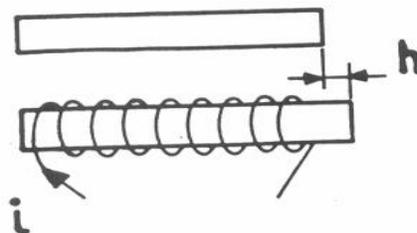
**FIGURA 16.** Deformación del Titanato de Bario Polarizado.

Los materiales denominados cerámicos polarizados son electrostrictivos y de gran interés para su aplicación del ensayo por ultrasonido; ya que, comparados con los cristales naturales, su fabricación excluye todo problema de corte. Son elaborados a partir de polvos moldeados a temperatura y presión altas; pueden moldearse para darles todas las formas y las dimensiones deseables.

Un limitante de estos materiales es el efecto de la temperatura, que es diferente al observado en la piezoelectricidad natural, pues si un cerámico polarizado se calienta a una temperatura superior a la de su punto de Curie, se pierde de forma irreversible la polarización del material y al enfriarse nuevamente a la temperatura ambiente sólo se restituyen las propiedades electrostrictivas del cerámico.

### 2.4.3. Magnetostricción.

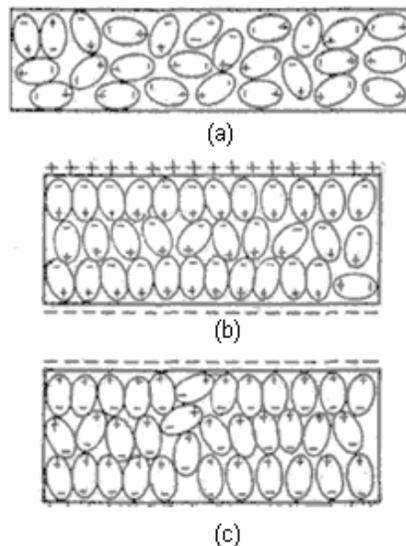
El efecto magnetostrictivo directo consiste en la orientación preferente de los dominios magnéticos bajo la acción de un campo magnético externo, dicha orientación provoca la deformación del material. El efecto magnetostrictivo recíproco consiste en la generación de campos magnéticos debido a la deformación de los materiales (figura 17).



**FIGURA 17.** Influencia de un campo magnético sobre un material magnetostrictivo.

Cuando no existe un gradiente eléctrico en el material ferroeléctrico, las moléculas estarán orientadas al azar **(a)**. Al aplicar voltaje, las moléculas tienden a alinearse en la dirección del campo **(b)**; en éste momento se produce un aumento del espesor como el voltaje se aplica de forma alterna, al bajar a cero volverá a su espesor normal **(a)**, aumentará el espesor polarizándose las moléculas de forma opuesta **(c)**, volverá a cero, y así sucesivamente se producirán las vibraciones.

Los materiales ferroeléctricos, por propiedades, no pueden producir altas frecuencias, es por esto que con cierta metodología, es posible cambiar su comportamiento hacia la piezoelectricidad. El método es el siguiente; el material es calentado por encima de su punto de Curie (la temperatura por encima de la cual una estructura pierde sus propiedades ferroeléctricas), a la vez que se le aplica voltaje lateralmente (aproximadamente 1.000 voltios por milímetro de espesor), el cual será mantenido hasta el enfriamiento. El material ha sido polarizado, por lo que exhibirá propiedades piezoeléctricas.



**FIGURA 18.** Orientación de las moléculas en un material magnetostrictivo.

El empleo de la magnetostricción está limitado a la emisión y recepción de frecuencias ultrasónicas bajas, aproximadamente de 100 KHz. Los osciladores magnetostrictivos se operan a su resonancia mecánica natural para amplificar el efecto deseado. Entre estos materiales se encuentran el níquel y sus aleaciones, los aceros y las ferritas. La ventaja de estos materiales, en comparación con los piezoeléctricos, es la alta temperatura de su punto de Curie. De los tres efectos descritos (piezoelectricidad, electrostricción y magnetostricción) el efecto piezoeléctrico es el más utilizado para la generación y recepción de ondas ultrasónicas.

#### 2.4.4. Construcción de cristales.

La eficiencia máxima de un cristal, se logra cuando la frecuencia de la excitación eléctrica coincide con la frecuencia característica del oscilador. Si " $T$ " es el espesor del cristal, y " $v$ " velocidad acústica del mismo, la frecuencia fundamental " $f$ " será dada por:

$$f = \frac{v}{2T}$$

Independientemente del material de fabricación del cristal piezoeléctrico, éste debe ser maquinado en cuanto a forma y espesor. La forma viene dada por el tipo de palpador, y el espesor por la frecuencia de trabajo según la siguiente ecuación:

$$T = \frac{\lambda}{2}$$

Donde;

$T$  = Espesor del cristal.

$\lambda$  = Longitud de onda.

Cumpliendo ésta relación se obtendrá la eficiencia máxima del cristal. Entre los materiales de fabricación de cristales piezoeléctricos más comunes, se encuentran: el Cuarzo, el Sulfato de Litio y las Cerámicas Polarizadas (Titanato de Bario, Metaniobato de Plomo y Zirconato Titanato de Plomo). Sin embargo, para usos especiales se emplean; Sal de Rochelle o Tartrato Sódico Potásico (KDP), Fosfato Monoamónico (ADP) Tartrato Dipotásico (DKT), Tartrato de Etilendiamina (EDT), así como la Turmalina. En la tabla 2, se muestran algunas características físicas de los materiales piezoeléctricos.

	Cuarzo	Sulfato de Litio	Titanato de Bario	Mataniobato de Plomo	Zirconato Titanato de Plomo	Unidades
Densidad	2.65	2.06	5.4	6.2	7.5	g/cm <sup>3</sup>
Velocidad Acústica	5.74	5.46	5.10	3.30	4.00	$\times 10^6$ mm/seg
Impedancia (Z)	15.3	11.2	27	20.5	30	$10^6$ kg/mm <sup>2</sup>
Temperatura Crítica	576	130	120	550	190-350	°C
Constante Dieléctrica	4.5	10.3	1000	300	400-4000	
Coefficiente de Acoplamiento electromecánico	0.10	0.35	0.45	0.42	0.6-0.7	
Módulo Piezoeléctrico	2.3	15	125-190	85	150-593	$10^{-12}$ m/V
Constante de Deformación Piezoeléctrica	4.9	8.2	1.1-1.6	1.9	1.8-4.6	$10^9$ V/m
Constante de Presión Piezoeléctrica	57	156	14-21	32	20-40	$10^{-3}$ Vm/N

**TABLA 2.** Propiedades físicas de los materiales piezoeléctricos.

Si se considera lo anteriormente expuesto al describir el efecto piezoeléctrico, resulta evidente que se logrará la eficiencia máxima cuando la frecuencia de la excitación mecánica o eléctrica coincida con la frecuencia característica fundamental del oscilador.

Si el cristal piezoeléctrico se excita a una frecuencia distinta de la característica fundamental, oscilará a aquella frecuencia según una oscilación forzada, pero con una amplitud mucho menor. Para la generación y recepción de ondas ultrasónicas de muy altas frecuencias, serían precisos espesores del cristal muy finos, lo que daría lugar a serias dificultades prácticas. Estas se salvan de forma muy ventajosa mediante la excitación de armónicos, a pesar de su menor amplitud. Así, por ejemplo, en lugar de emplear un espesor del orden de 0.1 mm en un cristal de cuarzo de corte X para una frecuencia de 30 MHz, es preferible excitar un cristal de 0.3 mm en su tercer armónico, con lo cual el cristal será menos frágil y poseerá una resistencia dieléctrica más elevada.

Debido a pérdidas de energía propias del oscilador y de los medios de acoplamiento, las oscilaciones se amortiguan por medio de un factor de amortiguamiento. Se podría suponer que tal hecho influiría en la frecuencia, sin embargo, **la frecuencia de resonancia** en estas condiciones es prácticamente la misma que la frecuencia característica fundamental sin amortiguación. Solo para valores muy altos de la amortiguación, la desviación entre ambas se manifiesta.

Para la obtención de ondas ultrasónicas por pulsos, el cristal piezoeléctrico se excita mediante choques o pulsos (tiempos de actuación de la excitación muy cortos). Para evitar que su vibración se prolongue excesivamente, es decir, que los pulsos resulten demasiado largos, se coloca en una de las caras del cristal un material de gran poder de amortiguación. La otra cara del cristal se aplica, ya sea directamente sobre la pieza a inspeccionar o se le coloca un material plástico protector, lo que permite obtener pulsos de pocas vibraciones. En los palpadores angulares el propio prisma de plástico puede actuar como amortiguador.

#### **2.4.5. Materiales piezoeléctricos.**

##### **a) Cuarzo.**

Se obtiene a partir de cristales naturales. Posee excelentes características de estabilidad térmica, química y eléctrica. Es insoluble en la mayoría de los líquidos. Es muy duro y resistente al desgaste, así como al envejecimiento. Desafortunadamente, sufre interferencias en el modo de conversión y es el menos eficiente de los generadores de energía acústica. Requiere alto voltaje para su manejo a bajas frecuencias, se debe emplear a temperaturas menores a 550 °C, pues por arriba de esta temperatura pierde sus propiedades piezoeléctricas.

##### **b) Sulfato de Litio.**

Este material se considera como uno de los receptores más eficientes. Su ventaja principal reside en su facilidad de obtener una amortiguación acústica óptima, lo que mejora el poder de resolución. No

envejece y es poco afectado por el modo de conversión. Sus desventajas son que es muy frágil, soluble en agua y se debe emplear a temperaturas menores de 75° C.

### **c) Cerámicos polarizados.**

Se obtienen por sinterización y se polarizan durante el proceso de fabricación. Se consideran como los generadores más eficientes de energía ultrasónica cuando operan a bajos voltajes de excitación. Prácticamente no son afectados por la humedad y algunos pueden emplearse hasta temperaturas de 300° C. Sus principales limitaciones son: resistencia mecánica relativamente baja, en algunos casos existe interferencia en el modo de conversión, presentan tendencia al envejecimiento, además poseen menor dureza y resistencia al desgaste que el cuarzo. Los materiales de este tipo utilizados con mayor frecuencia son:

#### **1) Titanato de Bario.**

Se considera un buen emisor debido a su elevado módulo piezoeléctrico. Sus limitaciones más importantes son problemas de acoplamiento y amortiguación. Su empleo está limitado a frecuencias menores de 15 MHz, debido a su baja resistencia mecánica y alta impedancia acústica; presenta interacción entre varios modos de vibración y la temperatura de su punto de Curie es de 115- 150 ° C.

#### **2) Metaniobato de Plomo.**

Presenta un módulo piezoeléctrico elevado, lo que califica como un buen emisor. Posee excelente estabilidad térmica, similar al cuarzo, lo que le permite ser empleado a altas temperaturas. Otra ventaja es que posee un elevado coeficiente de amortiguación interna, por lo que se considera el mejor material para generar impulsos cortos. Una de sus limitaciones es que presenta una baja frecuencia fundamental y una mala resistencia mecánica, por lo que se aplica principalmente a frecuencias altas, otra limitante es que presenta interacción entre varios modos de vibración.

#### **3) Zirconato Titanato de Plomo.**

Se considera como el mejor emisor por su alto módulo piezoeléctrico, sin embargo, es el más difícil de amortiguar por su alto coeficiente de deformación. Se recomienda su empleo cuando existen problemas de penetración.

### **2.5. El palpador.**

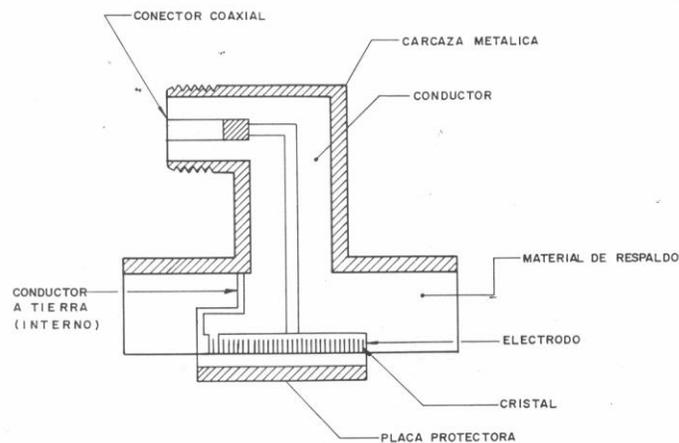
Después de conocer los materiales piezoeléctricos y los efectos que intervienen en la generación de ondas ultrasónicas, corresponde enumerar y describir los elementos que conforman un palpador comúnmente empleado en el ensayo por ultrasonido. Aunque es frecuente el uso de transductor y palpador como sinónimo, es recomendable conocer las definiciones establecidas para estos dos términos.

En el ensayo por ultrasonido se define como *transductor a aquel elemento que tiene por función transformar energía mecánica (vibraciones) en energía eléctrica o viceversa, que es el caso de los cristales piezoeléctricos*. Así mismo, se define como *palpador (unidad de búsqueda) al arreglo que permite la manipulación del transductor para efectuar el ensayo*.

*Frecuencia de Resonancia se define como la frecuencia a la cual el sistema actúa bajo condiciones tales que la interacción entre el agente impulsor y el sistema se ven ampliados a un valor máximo.*

### 2.5.1. Componentes de un palpador.

- a) **Carcasa metálica:** Envoltorio que sirve como blindaje y proporciona la resistencia mecánica.
- b) **Cristal:** Pequeña placa de material piezoeléctrico y que es el elemento principal del palpador.
- c) **Electrodos:** Placas conductoras de la corriente eléctrica que se encuentran en las caras del cristal y que pueden depositarse sobre este por medio de condensación de los vapores de oro y plata, como por ejemplo los cristales fabricados de cuarzo o cerámicos polarizados. En el caso de emplear cristales de Sulfato de Litio, los electrodos generalmente se fabrican de placas metálicas y se adhieren posteriormente al cristal.
- d) **Placa protectora o de uso:** Es un elemento de protección, su presencia en el transductor depende de las propiedades físicas y de la resistencia mecánica del cristal al desgaste con la superficie de ensayo.
- e) **Material de respaldo:** Sirve como soporte del cristal y como amortiguador mecánico y acústico. Se encuentra adherido firmemente al cristal por la cara opuesta a la de contacto y tiene dos funciones: amortiguar las vibraciones por la inercia del cristal para evitar que vibre libremente al ser excitado, y absorber las vibraciones generadas en el sentido opuesto al deseado; lo anterior se logra con materiales de alta impedancia acústica y alto coeficiente de atenuación. Esto último es importante, pues si no se eliminan las vibraciones, secundarias o inerciales del cristal, aumenta la zona muerta del palpador y la señal inicial puede presentar perturbaciones que reduzcan la resolución y la sensibilidad del transductor.



**FIGURA 19.** Componentes de un Palpador.

## 2.5.2. Clasificación de los palpadores.

Existen diferentes formas de clasificar los palpadores. A continuación se describe una forma de acuerdo a:

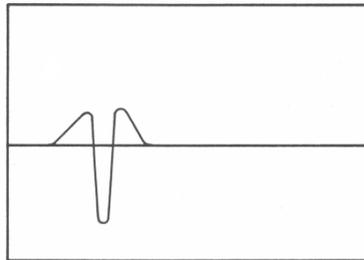
- A) El grado de amortiguamiento del transductor.
- B) La forma de propagación del haz.
- C) El método de inspección.
- D) El número de cristales.
- E) Por aplicaciones especiales.

### 2.5.2.1. El grado de amortiguamiento del transductor.

En el caso del grado de amortiguamiento, éste determina si el transductor es de banda ancha o banda angosta. El ancho de la banda significa la gama de frecuencias que son iguales o mayores al 70% de la frecuencia central.

#### 2.5.2.1.1. Palpador de banda ancha.

Cuando el cristal está fuertemente amortiguado se obtienen pulsos cortos como se muestra en la figura.



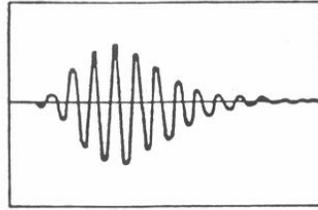
**FIGURA 20 - A.** Pulso ultrasónico de banda ancha.

Las características principales de este tipo de palpadores son:

- Reducción del campo muerto.
- Pulsos acústicos de corta duración, de uno o dos ciclos de vibración.
- Elevado poder de resolución que permite realizar mediciones de tiempo de recorrido exactas.
- Menor sensibilidad.
- Menor poder de penetración.
- Mayor atenuación.

### 2.5.2.1.2. Palpador de banda angosta.

Cuando el cristal esta poco amortiguado el pulso es largo (figura 20 - B) y en consecuencia, su espectro de frecuencia es más amplio y se encuentra situado cerca de la frecuencia de resonancia del cristal.



**FIGURA 20 - B.** Pulso ultrasónico de una banda angosta.

Al aumentar el amortiguamiento se reduce la sensibilidad del transductor y se incrementa su poder de resolución cuando hay pulsos de corta duración. Sin embargo, al comparar palpadores de una misma serie (igual grado de amortiguamiento), e iguales dimensiones, se comprueba que al aumentar la frecuencia se incrementa el poder de resolución.

El amortiguador del cristal es un elemento indispensable en los equipos que operan por el método pulso-eco. Sus finalidades son las siguientes:

- 1) Reducir el tiempo de oscilación del cristal.
- 2) Absorber las ondas que pudieran interferir en el oscilograma.
- 3) Soportar mecánicamente el cristal piezoeléctrico.

Posiblemente de estas tres finalidades, sea la primera la más importante, ya que la duración del pulso acústico define la llamada zona muerta del palpador, que es la base de tiempo ocupada por la señal de emisión en el Tubo de Rayos Catódicos (**TRC**).

En esta zona muerta no será posible detectar la presencia de discontinuidades, puesto que las indicaciones de los posibles ecos quedarían enmascaradas.

De acuerdo a la dirección del haz con relación a la superficie de las piezas, se clasifican en *palpadores de incidencia angular y de incidencia normal*.

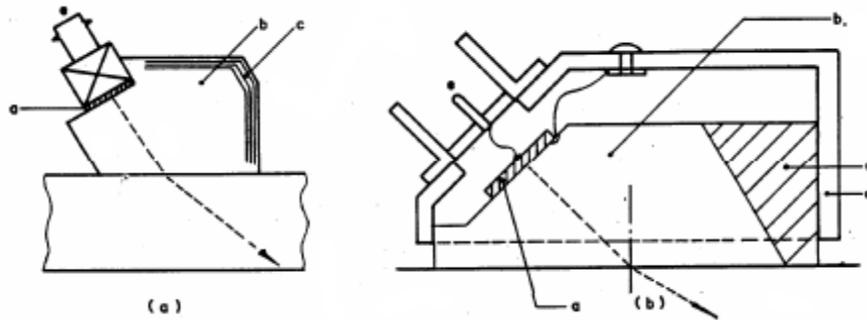
### 2.5.2.2. La forma de propagación del haz.

#### 2.5.2.2.1. Palpador de incidencia normal o de haz recto.

Emite ondas longitudinales con frecuencias de 0.5 a 10.0 MHz. Se emplea generalmente para el ensayo de piezas en las que se puede colocar directamente la unidad de prueba sobre el área de interés y las discontinuidades son paralelas a la superficie de contacto. También es útil en la detección de discontinuidades y en la medición de espesores.

### 2.5.2.2.2. Palpador de incidencia angular.

Genera ondas de corte, de superficie y de placa. Se construye acoplando una unidad de haz recto a una de las caras de una zapata de plástico, la cual presenta determinado ángulo de refracción (figura 21). Se emplea en los equipos de pulso-eco y su aplicación es casi exclusiva en la detección de discontinuidades orientadas perpendicularmente a la superficie de ensayo.



**FIGURA 21.** Transductores angulares de contacto. a) Cristal piezoeléctrico, b) Prisma de plástico (zapata), c) Amortiguador, d) Protector metálico o montura, e) Conexión.

#### 2.5.2.2.2.1. Tipos de palpadores angulares.

Existen diversas formas de clasificar a estos palpadores, la más común se basa en el tamaño, frecuencia, forma, tipo e intercambiabilidad de la zapata, temperatura de prueba, etc. La zapata o cuña se fabrica de plexiglás y el transductor va asentado en ángulo en la parte superior delantera de la zapata. Tiene unas ranuras o muescas que ayudan a atenuar las ondas ultrasónicas secundarias que vienen de regreso al transductor y así no causen interferencia que pueda influir en el resultado de un ensayo. Tienen marcado en la zapata el ángulo de refracción del sonido dentro del material de prueba, los ángulos comerciales para acero son: 35, 45, 60, 70, 80 y 90 grados. A su vez estos palpadores pueden ser de ondas:

- Transversales.
- De superficie.
- De Lamb.

#### 2.5.2.3. Clasificación de los palpadores en base al método de inspección.

Otra clasificación se basa en el método de inspección empleada, para lo cual los palpadores pueden ser de contacto o de inmersión.

### 2.5.2.3.1. Palpador de contacto.

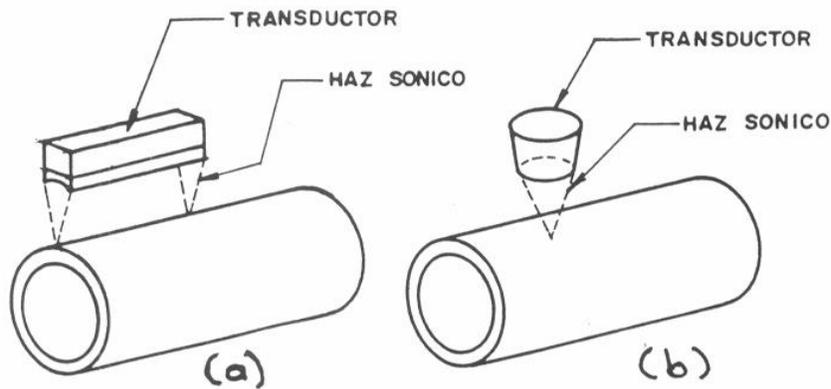
Se coloca directamente en la superficie de ensayo aplicando presión y un medio de acoplamiento. Se fabrica para ensayos con haz recto y con haz angular. Para proteger al transductor de la abrasión se cubre con un material duro como el óxido de aluminio.

### 2.5.2.3.2. Palpador de inmersión.

La transmisión del ultrasonido desde el transductor a la pieza se efectúa a través de una columna de líquido (acoplante), a fin de que no exista contacto directo, presión o rozamiento entre el transductor y la pieza.

Los palpadores de inmersión pueden ser planos o cóncavos, y a su vez estos últimos se dividen en:

- De enfoque cilíndrico hacia una línea, que es usado para inspeccionar tubos y barras.
- Con punto de enfoque en forma de cono hacia un punto.



**FIGURA 22.** Transductores de inmersión. a) Cóncavo de enfoque cilíndrico, b) Cóncavo de enfoque cónico.

En los palpadores cóncavos la distancia focal se obtiene por la relación:

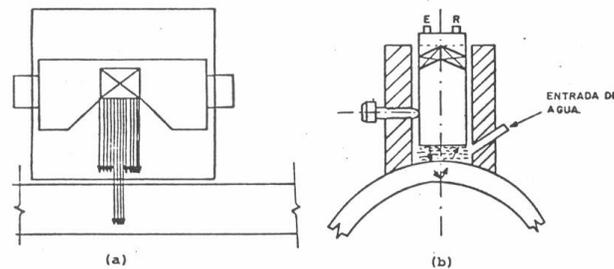
$$df = (r) \frac{n}{n-1}$$

Siendo “r” el radio de curvatura y “n” el índice de refracción del material de la lente en el líquido de inmersión. Es recomendable elegir como material del lente, aquel que presente alto índice de refracción en el agua y con una impedancia acústica similar a la del agua.

Un ejemplo serían el poliestireno y la resina epóxica que dan lugar a poca atenuación y son fáciles de maquinar. Es conveniente que el espesor de estas lentes sea delgado, y a fin de reducir los ecos por reflexiones internas.

Una variante de los palpadores de inmersión son los de *inmersión local*, que trabajan bajo el mismo principio y consisten de un dispositivo que asegura en todo momento el contacto acústico entre el transductor y la pieza a través de una columna de líquido; de manera que el cristal del transductor no roce con la superficie de la pieza y se asegure el acoplamiento acústico en forma continua. Se aplican piezas de forma simple como chapas, barras, tubos, piezas redondas, piezas cilíndricas y prismáticas.

Este tipo de palpadores son una solución intermedia entre las técnicas de contacto manual y las de inmersión con operación automática.



**FIGURA 23.** Transductores de inmersión local con incidencia normal. a) De un cristal, b) De dos cristales.

#### 2.5.2.4. Clasificación de los palpadores en base al número de cristales piezoeléctricos.

Con base en el número de cristales piezoeléctricos que llevan incorporados se consideran los siguientes tipos:

- 1) Un solo cristal que actúa como emisor y receptor.
- 2) Doble cristal, uno emisor y otro receptor.
- 3) Cristal múltiple.

##### 2.5.2.4.1. Palpador normal de cristal único (tipo E+R).

Este tipo de palpadores se componen de un solo cristal piezoeléctrico que realiza las funciones de emisor y receptor. Constan de las siguientes partes: un cristal piezoeléctrico, una caja o montura metálica que protege el conjunto, además del amortiguador del cristal, un hilo conductor eléctrico y una conexión.

Este palpador es frecuentemente empleado en las aplicaciones generales. El contacto eléctrico para transmitir el pulso de excitación, se realiza en el cuarzo y en los cristales cerámicos, mediante una suspensión de plata metálica extendida sobre las caras del cristal, la cual seca a unos 500 °C, y aportando soldadura a continuación los electrodos con soldadura de plata.

Tanto en el caso del sulfato de litio (punto de Curie 75°C) y del titanato de bario (punto de Curie 115- 150 °C) el recubrimiento se puede hacer pintando las superficies con suspensión de plata conductora de secado en frío, mientras que los electrodos se adhieren mediante cemento conductor.

En los palpadores de contacto sin membrana protectora, el recubrimiento con plata no es una solución eficaz ya que se elimina fácilmente por desgaste y rozamiento. Por este motivo, se deben emplear para este tipo de palpadores cristales de cuarzo, que por sus características permiten su uso sin membrana protectora; en este caso solo se metaliza la cara interna y la propia muestra metálica funciona como electrodo, en sustitución del recubrimiento externo. Con este tipo de palpadores se alcanza un poder de resolución más elevado pero, para el ensayo de piezas no metálicas o con las superficies oxidadas, es preciso utilizar un medio de acoplamiento que sea conductor.

Cuando no se requiere un poder de resolución máximo, es preferible proteger al cristal contra el desgaste por medio de películas o membranas. A este fin se utilizan películas finas de plástico cuya resistencia al desgaste aumenta por adición de polvo de sustancias duras y que se pegan al cristal mediante una capa fina de adhesivo. También se emplean láminas de caucho o plástico blando de 0.2- 0.3 mm de espesor, fáciles de sustituir cuando se estropean. En este caso el espacio entre el cristal y la lámina se debe llenar de aceite o grasa. No obstante, actualmente se tiende a recubrir el cristal de una lámina de cuarzo o zafiro, que son muy resistentes al desgaste, químicamente inertes y con una influencia sin importancia sobre la sensibilidad del palpador.

Un buen palpador de cristal sencillo debe poseer alta sensibilidad para distancias grandes y un buen poder de resolución. Para conseguir lo primero se utilizará el palpador de diámetro y frecuencia máximos, compatibles con la atenuación del material a ensayar; y a la vez, es conveniente mantener la amortiguación en valores bajos con el fin de que el cristal pueda detectar impulsos débiles.

Ahora bien, esta última condición se opone al segundo requerimiento, ya que solo con una amortiguación elevada se puede reducir la longitud de la zona muerta, y simultáneamente, conseguir impulsos acústicos de corta duración.

Ambas condiciones son necesarias para el poder de resolución, tanto en las proximidades de la superficie de ensayo como en lo que respecta en la propiedad de distinguir heterogeneidades próximas entre sí. Por lo tanto, con un material piezoeléctrico dado, un palpador solo será óptimo con respecto a la sensibilidad o con respecto al poder de resolución, pero nunca para ambos requisitos a la vez.

#### **2.5.2.4.2. Palpador dúplex o doble cristal (Tipo E-R).**

El transductor de doble cristal, uno emisor y otro receptor, trata de resolver el problema de la zona muerta que se presenta en los palpadores de un solo cristal, lo que impide o dificulta la detección de heterogeneidades próximas a la superficie de inspección. En los palpadores sin membrana protectora, la zona muerta oscila entre 4 y 5 mm (en acero), por lo cual no será posible inspeccionar piezas de ese

espesor o menor. Si el palpador esta protegido, la zona muerta puede rebasar los 10 mm, dependiendo de la frecuencia.

Los palpadores tipo E-R constan de dos cristales perfectamente aislados eléctrica y acústicamente por medio de una lámina de corcho o policloruro de vinilo, ambos cristales se montan con una cierta inclinación sobre una columna de plástico que produce un efecto focalizador, de forma que concentre el haz ultrasónico para conseguir máxima sensibilidad en las proximidades de la superficie. Mediante este recurso se consigue que, por efecto del trayecto previo en plástico, la indicación de la señal de emisión quede muy separada del eco producido por la heterogeneidad. La nueva posición cero de la escala de distancias queda señalada por una indicación muy débil procedente del eco de la superficie de la pieza.

La columna de plástico se construye a partir de un material de bajo coeficiente de atenuación, con una impedancia acústica tal que produzca una buena transmisión en la pieza a través del medio de acoplamiento correspondiente. Si la diferencia de impedancia es muy elevada, se producirá una reflexión fuerte en la superficie, lo que dará lugar a la consiguiente pérdida de energía y reforzamiento del eco de la interfase o superficie de exploración. Se comprueba que la altura de la indicación del eco decrece rápidamente a ambos lados de la distancia óptima, que para este palpador en concreto, se sitúa hacia los 12 mm.

La posición de la zona de máxima sensibilidad es función de la inclinación de los cristales y de la frecuencia. Con este tipo de palpador y con equipos adecuados es posible medir espesores y detectar heterogeneidades, a partir de una profundidad equivalente de una longitud de onda. Posee alto poder de resolución y por tanto, detecta discontinuidades muy próximas a la superficie de la pieza. La diferencia entre la señal útil y el nivel de interferencia dentro del campo de trabajo es mejor que en el caso de los palpadores con cristales individuales.

Esto es sumamente conveniente en estructuras de grano grueso. Se utiliza principalmente para inspeccionar corrosión, erosión y espesores.

Una de las grandes ventajas que presentan estos palpadores es el de poder utilizar los cristales más apropiados para cada inspección, por ejemplo, el Titanato de Bario como emisor y el Sulfato de Litio como receptor.

#### **2.5.2.4.3. Palpador de cristal múltiple (de brocha o de mosaico).**

Se fabrica de un patrón tipo mosaico, constituido de pequeños cristales colocados de manera que la intensidad del haz varíe muy poco sobre la longitud total del palpador, lo que es necesario para mantener la uniformidad de la sensibilidad.

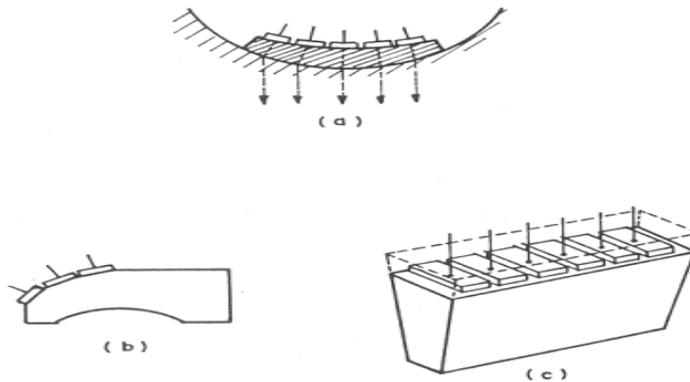
Estos palpadores proporcionan un haz largo, delgado y rectangular (en su sección transversal) para recorrer grandes superficies. Su propósito es detectar rápidamente las discontinuidades en la pieza en ensayo. Los palpadores de menor tamaño y mayor sensibilidad se utilizan para definir el tamaño, forma,

orientación y localización de las discontinuidades. Este tipo de palpadores está diseñados para aplicaciones tales como:

- a) Medida simultánea de espesores en varios rangos.
- b) Inspección de superficies curvas.
- c) Inspección de piezas grandes.

En la figura 24 (a) se representa el esquema de un transductor para el ensayo de piezas de superficies cóncavas. Está constituido por varios cristales dispuestos en mosaico y montados sobre un adaptador de plástico que hace el efecto de lente, con lo que se consigue un haz sin divergencia.

El transductor de la figura 24 (b) resulta apropiado para la inspección de tubos, ya que su diseño evita la formación de ondas superficiales que dificulten la interpretación. La figura 24 (c) representa un transductor diseñado para la inspección por inmersión de piezas grandes.



**FIGURA 24.** Transductores de cristal múltiple.

#### **2.5.2.5. Clasificación de los palpadores por aplicaciones especiales.**

##### **2.5.2.5.1. Palpadores especiales.**

Son útiles en el ensayo de piezas con características especiales, como lo es la complejidad de su forma e incluso la naturaleza del material. Debido a que las aplicaciones de estos palpadores son muy específicas, solo se describirán brevemente sus características y usos.

##### **2.5.2.5.2. Palpador con transductor libre.**

El cristal oscila libremente, es decir, está sometido a su propia amortiguación interna, ya que carece de material amortiguante, lo que implica bajo poder de resolución, pero sensibilidad elevada. Los pulsos acústicos de baja energía son capaces de excitar el cristal para que se genere una señal eléctrica suficiente para proporcionar una indicación, esto permite utilizar éstos palpadores en el ensayo de materiales de elevado coeficiente de atenuación, cuando resulten imprácticos los palpadores

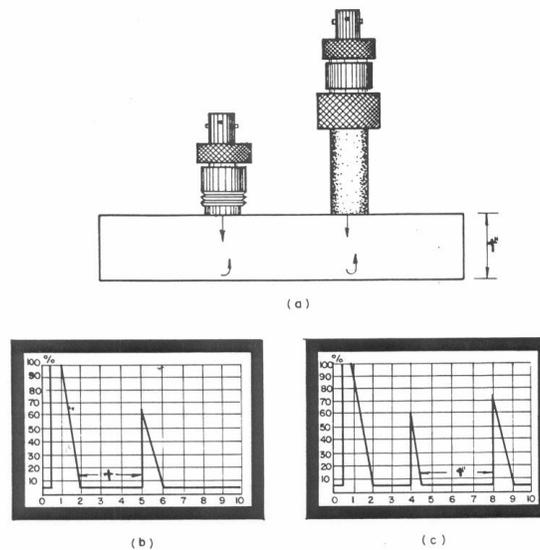
convencionales. Además, es posible mejorar el ensayo con el empleo de frecuencias muy bajas y aplicando el método de transparencia, por lo que se puede efectuar el ensayo de sólidos, de algunos plásticos y de mezclas de resinas para aislantes.

### 2.5.2.5.3. Palpador superamortiguado.

Al contrario de los anteriores, la amortiguación es muy alta, de tal forma que es capaz de transmitir pulsos eléctricos extremadamente cortos, lo que confiere un poder de resolución elevado. Este palpador se utiliza principalmente en el ensayo de piezas de pared delgada y de bajo coeficiente de atenuación, donde además se requiera un alto poder de resolución.

### 2.5.2.5.4. Palpador con línea de retardo.

Es un palpador de haz longitudinal que va montado sobre una cuña llamada “línea de retardo”, hecha de lucita o de plexiglás (acrílico) y cuyo propósito es incrementar la resolución cerca de la superficie frontal. Así mismo, reduce hasta una tercera parte el campo muerto.



**FIGURA 25.** Efecto del transductor con línea de retardo. a) Material ensayado con y sin línea de retardo. b) Oscilograma obtenido para el transductor sin línea de retardo. c) Oscilograma correspondiente al transductor con línea de retardo.

### 2.5.2.5.5. Palpador puntual.

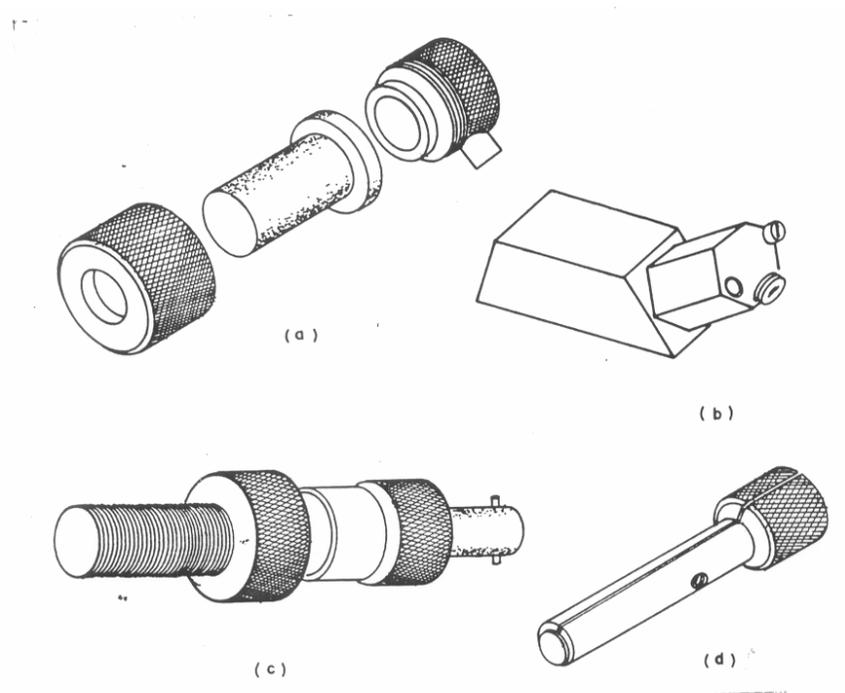
Consta de una aguja de acero, cuya punta se apoya sobre la pieza de ensayo y en el extremo opuesto lleva adherido un cristal piezoeléctrico generalmente de Titanato de Bario. Es muy sensible como receptor y no requiere de amortiguación. El conjunto va montado sobre una vaina que le da la apariencia de un lápiz. Se puede utilizar sólo como receptor y resulta muy útil para el estudio de la distribución de presiones acústicas en piezas de forma compleja.

### 2.5.2.5.6. Palpador de alta temperatura.

Se utiliza sobre piezas muy calientes, por ejemplo, después de forja, rolado, etc. Usando este tipo de palpadores el ensayo puede realizarse de dos formas:

A) Utilizando el palpador directamente, a través de un acoplante especial llamado “pyrogel”, que trabaja hasta una temperatura de 260°C. El contacto del palpador es intermitente.

B) Utilizando una línea de retardo hecha con un material especial llamado “vespel”, el cual es muy difícil de maquinar. Se puede empelar entre 427 y 538 °C, al fundirse permite la formación del acoplante.



**FIGURA 26.** Transductores para alta temperatura. a) Componentes de un transductor longitudinal b) Haz angular c) Haz longitudinal d) Dúplex o doble cristal.

### 2.5.2.5.7. Palpador focalizado.

Generalmente se compone de un transductor de cristal sencillo al que se le acoplan aditamentos llamados “lentes acústicos” que sirven para enfocar el sonido y aumentar la confiabilidad del ensayo. Las ventajas de emplear este tipo de palpador son:

- a) Aumentan la sensibilidad para detectar discontinuidades pequeñas.
- b) Aumentan el poder de resolución.
- c) Reducen el efecto de la rugosidad de la superficie de la pieza.
- d) Reducen el ruido del metal.

Los lentes acústicos pueden fabricarse de diferentes materiales: Metacrilato de Metilo, poliestireno, resina epóxica, aluminio y magnesio. Las propiedades de estos materiales son:

- Alto índice de refracción en el agua.
- Impedancia acústica cercana a la del agua o la del elemento piezoeléctrico.
- Baja atenuación interna del sonido.
- Fácil fabricación.

La focalización del haz se consigue usando un cristal piezoeléctrico de forma cóncava. Este mismo efecto de focalización se logra colocando sobre el cristal piezoeléctrico plano una lente convergente. En el caso particular de los cristales piezoeléctricos de cuarzo, que se cortan en un monocristal cuyas caras deben estar perfectamente planas, la focalización deberá hacerse necesariamente a través de una lente convergente. Por otra parte, los palpadores focalizados pueden estar focalizados a un punto o a una línea. Los palpadores focalizados concentran una gran cantidad de energía en una zona limitada, teniendo como consecuencia de esto una sensibilidad muy alta en las cercanías de la zona focal, pero fuera de ésta la sensibilidad cae a valores muy bajos.

Los palpadores focalizados tienen la ventaja adicional de permitir un ensayo de la pieza solo en la zona considerada; para ensayar el resto de la pieza se focaliza el haz ultrasónico a otra profundidad, variando el camino de éste en el agua. La concentración de la energía ultrasónica obtenida mediante la focalización disminuye el fenómeno de pérdida de sensibilidad ocasionada por la dispersión del haz, lo que permite el ensayo de materiales de alta atenuación sónica, como por ejemplo el acero inoxidable. Otra ventaja de los palpadores focalizados es la excelente definición lateral del haz ultrasónico que permite evaluar en términos muy precisos las dimensiones reales del defecto y su ubicación, especialmente en el caso de defectos orientados en forma no perpendicular al haz ultrasónico. Una condición que debe cumplirse en este caso es que el tamaño de la discontinuidad sea mayor que el foco del haz.

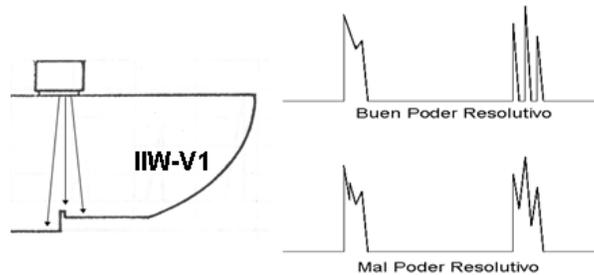
El palpador tiene que ser seleccionado teniendo en cuenta las condiciones planteadas por el material, la forma y las dimensiones de la pieza, al mismo tiempo considerando los requisitos del ensayo, como es el caso del tamaño mínimo de la discontinuidad que se desea detectar.

### **2.5.3. Características de los palpadores.**

En el diseño de palpadores ultrasónicos, deben ser contempladas dos características básicas; *resolución y sensibilidad*.

### 2.5.3.1. Resolución.

La resolución o el poder de resolución es la habilidad que presenta un palpador para separar o identificar las señales de indicación de varios reflectores diferentes y cercanos, en lo que a profundidad se refiere.



Verificación del poder resolutivo.

### 2.5.3.2. Sensibilidad.

La sensibilidad de un palpador, es la habilidad para detectar discontinuidades del menor tamaño posible, podemos referirnos, entonces, al **“tamaño crítico de un posible defecto”**, característica que debe ser suministrada por el fabricante como dato de calibración.

### 2.5.4. Selección de palpadores.

Sin tener en cuenta los palpadores especiales, utilizados en ensayos específicos, tales como: palpadores focalizados, palpadores con oscilación libre del cristal, palpadores superamortiguados, palpadores puntuales, palpadores periscópicos, etc. Existe un gran número de palpadores, los cuales conviene saber elegir para una aplicación determinada. Una primera elección se realiza a la hora de hacer distinción entre palpadores para detectar reflectores, y palpadores que determinen con precisión la profundidad y tamaño de un posible defecto.

La detección de reflectores, los cuales pueden ocupar diferentes posiciones y tener varias formas, requiere que el haz sonoro del palpador cubra la máxima superficie de la pieza inspeccionada, por lo que son aconsejables palpadores de relativamente baja frecuencia, que poseen una divergencia angular bastante grande. Estos palpadores, por el contrario, nos proporcionan una baja sensibilidad, por lo cual los reflectores, que se encontrarán, tendrán un tamaño relativamente grande.

Si elegimos un haz sonoro estrecho con alta intensidad, podremos detectar reflectores muy pequeños en la pieza, por lo que se corre el riesgo de "saltar" algún defecto.

Una vez detectado un reflector en el material, el siguiente paso es determinar su posición exacta, así como su tamaño. Para esto conviene elegir un palpador cuyo haz sufra la máxima distorsión al llegar a éste reflector, y que el haz incida sobre el reflector lo más perpendicularmente posible, con la finalidad de que nos refleje la mayor cantidad de haz hacia el palpador.

Consecuentemente y según lo expuesto anteriormente, un palpador que sea el apropiado para detectar discontinuidades o reflectores, no tiene porque serlo para determinar la posición y el tamaño del reflector. Lo contrario puede también suceder.

Para la inspección de materiales, cuya estructura metalográfica sea calificada como grano fino, se ha encontrado que las frecuencias de ensayo más apropiadas son las comprendidas entre 2 y 5 MHz, teniendo una razonable sensibilidad, junto con un buen poder resolutivo a grandes distancias. Para el acero, las longitudes de onda van de 1 a 3 milímetros, por lo que, en condiciones favorables (teóricamente), se pueden detectar discontinuidades de 0,9 mm y mayores, tamaños que generalmente empiezan a ser tratados como defectos.

En materiales con estructuras bastas (grano grueso), conviene utilizar frecuencias bajas o muy bajas, del orden de 0,5 a 2 MHz, pudiéndose incluso evaluar materiales con un coeficiente de atenuación alto, tal y como pueden ser fundiciones, plásticos, etc.

Las frecuencias comprendidas entre 5 y 10 MHz, proporcionan haces de muy alta sensibilidad, pudiéndose detectar reflectores extremadamente pequeños, por lo que deben ser utilizadas en materiales cuya estructura metalográfica tenga un tamaño de grano sumamente fino.

Hay que tener en cuenta que, con el aumento de la frecuencia, y por consiguiente, disminución de la longitud de onda, la profundidad de penetración del haz disminuye, por lo que en caso de desear detectar reflectores a gran distancia conviene utilizar frecuencias mas bajas, o un palpador de mayor diámetro, cuya divergencia angular sea menor y, por tanto, tener mayor penetración.

Si los posibles reflectores se encuentran a poca distancia, es recomendable utilizar palpadores cuyo campo cercano sea corto, por lo que entre palpadores que trabajen a una misma frecuencia, conviene utilizar el de menor diámetro.

El poder de resolución y la sensibilidad, dependen en gran medida de la frecuencia utilizada (*a mayor frecuencia, mayor poder de resolución*), pero también hay que tener en cuenta el tipo de cristal que se emplea. Generalmente, se pueden utilizar los palpadores de Titanato de Bario, que junto con un buen poder resolutivo poseen una sensibilidad muy aceptable. Si se desea una gran sensibilidad se pueden utilizar palpadores con cristales especiales, que pueden ser de Sulfato de Litio o Metabionato de Plomo.

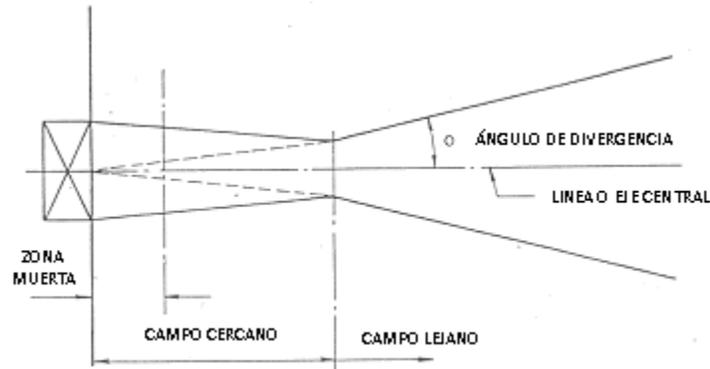
## **2.5.5. Efectos Fresnel y Fraunhofer.**

### **2.5.5.1. Descripción del comportamiento del haz ultrasónico.**

A continuación, se describe el comportamiento del haz ultrasónico una vez que inicia su propagación en el medio que esta siendo inspeccionado. Debe aclararse que la onda ultrasónica al inicio de su desplazamiento no produce una compresión uniforme, pero conforme avanza en el medio se homogeniza hasta obtener resultados repetitivos y confiables.

El comportamiento del haz ultrasónico puede modificarse en función de la geometría, frecuencia y características específicas del transductor; sin embargo, independientemente de estas variables siempre presentará las siguientes características:

- Un eje central.
- Una zona muerta.
- Un campo cercano o zona de Fresnel.
- Un campo lejano o zona de Fraunhofer.



**FIGURA 27.** Representación simplificada del haz ultrasónico.

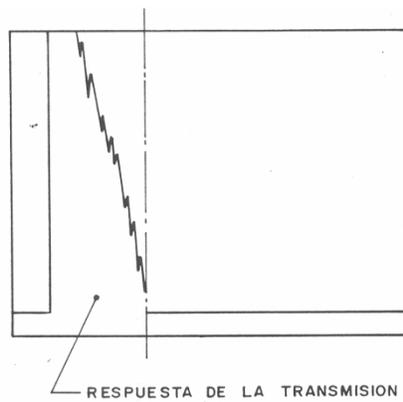
#### 2.5.5.1.1. Zona muerta.

Es la distancia frente al transductor (trayectoria previa) y su extensión es equivalente a la longitud de un pulso completo. En esta zona ninguna indicación puede detectarse (figura 27-A) debido a que existe un lapso en el cual el transductor ha dejado de vibrar pero está saturado y en consecuencia no detecta la señal que pueda generarse en el material a inspeccionar; y también porque el tiempo de recorrido de la señal es menor al tiempo de excitación del cristal y ésta es interferida por la emisión ultrasónica del transductor.

La zona muerta es importante porque limita ciertas aplicaciones del ensayo por ultrasonido, especialmente cuando se están inspeccionando materiales muy delgados o se requiere localizar indicaciones muy cercanas a la superficie en la que se introduce el haz ultrasónico. Una forma de disminuir esta limitante es emplear un transductor de doble cristal, o bien una línea de retardo.



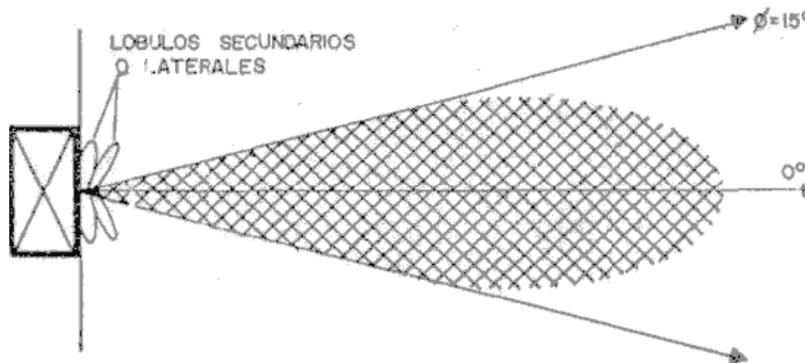
**FIGURA 27-A.** Representación de la zona muerta.



**FIGURA 27-B.** Representación de la respuesta de la transmisión del campo muerto.

### 2.5.5.1.2. Campo cercano o zona de Fresnel.

El efecto producido por la zona de campo cercano o Zona de Fresnel (ver figura 27), de un haz ultrasónico es, a veces, ignorado o desconocido, teniendo una gran importancia para la validez de los resultados. La energía es irradiada en todas la direcciones, a partir del punto de origen, y la presión acústica varía presentándose con máximos y mínimos; sin embargo, el haz tendría una forma totalmente esferoidal, de no ser por la existencia de los lóbulos laterales o secundarios, que no son más que zonas de fluctuación de la intensidad, producidas por efecto de los bordes del cristal, según el **Principio de Huygens**.



**FIGURA 28.** Geometría del haz para un palpador con un ángulo de divergencia de 15°.

La presencia de los lóbulos laterales causa que, para efecto de cálculos, el diámetro del cristal se vea reducido. La reducción se relaciona directamente con el diámetro y viene dada por la ecuación:

$$D_{ef} = \sqrt{\frac{4.N.V}{f}}$$

Donde;

$D_{ef}$  = Diámetro efectivo.

$N$  = Longitud de campo cercano.

Para efectos prácticos, el diámetro efectivo del cristal se considera como:

$$D_{ef} = 0,97.D$$

Donde;

$D_{ef}$  = Diámetro efectivo del cristal.

$D$  = Diámetro nominal del cristal.

La longitud de la Zona de Fresnel, varía de acuerdo con la longitud de onda y las dimensiones del cristal. Para palpadores con cristales circulares, la longitud de campo cercano viene dada por la siguiente ecuación:

$$N = \frac{D_{ef}^2}{4.\lambda} = \frac{0,94D^2.f}{4.V}$$

Para efectos teóricos utilizamos la siguiente ecuación:

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

Para palpadores con cristales de forma rectangular, donde la diferencia entre los lados no supera el 12 %, la longitud de la zona de campo cercano, será:

$$N = 1,3 \frac{A_{ef}^2.f}{V}$$

Donde;

$A_{ef}$  = La mitad de la longitud efectiva del lado más largo.

En la zona de campo cercano, por efecto de las fluctuaciones de la intensidad, es sumamente difícil lograr la detección de discontinuidades, pues se producirán indicaciones múltiples, y la amplitud de las mismas tendrá grandes variaciones de acuerdo a la distancia desde la superficie reflectora, a la cara del palpador.

### 2.5.5.1.3. Campo lejano o zona de Fraunhofer.

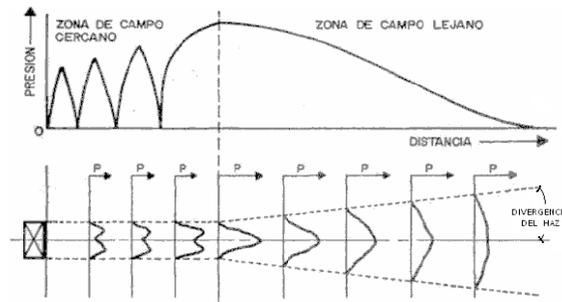


FIGURA 29. Distribución de la presión acústica a lo largo del recorrido del haz.

Es la región después del campo cercano y se caracteriza porque la intensidad del haz ultrasónico disminuye proporcionalmente a la distancia del transductor. La amplitud de la reflexión en el campo lejano disminuye exponencialmente con el aumento de la distancia. La amplitud máxima de la reflexión se presenta en el centro del haz. La pérdida exponencial de la amplitud de la señal en el campo lejano es el resultado de la *divergencia del haz* y la atenuación del mismo.

#### 2.5.5.1.3.1. Divergencia del haz.

En el campo cercano el haz ultrasónico se propaga en línea recta y en el campo lejano la onda acústica se expande al aumentar la distancia desde el emisor. Este fenómeno puede apreciarse en la figura 29.

Para una frecuencia dada, a mayor diámetro del cristal de un transductor, el haz presenta menor dispersión, a menor diámetro del cristal la divergencia del haz se incrementa. Si se mantiene constante el diámetro del cristal el ángulo de divergencia disminuye al aumentar la frecuencia. El ángulo de divergencia en el campo lejano puede determinarse por la siguiente ecuación:

$$\text{Sen } \alpha = 1,2 \frac{\lambda}{d} = 1,2 \frac{v}{f \cdot d}$$

Donde;

$\alpha$  = Ángulo de divergencia.

$v$  = Velocidad acústica en el material de ensayo.

$f$  = Frecuencia central del transductor.

$d$  = Diámetro del cristal transductor.

### 2.5.5.2. Atenuación de las ondas de sonido.

Cuando el sonido viaja a través de un medio, su intensidad disminuye con la distancia. En materiales ideales, la presión del sonido (amplitud de la señal) es reducida solamente por la propagación

de la onda. Los materiales reales, sin embargo, producen un efecto que debilita el sonido mientras se encuentra más lejos. Este debilitamiento posterior resulta de *la dispersión y de la absorción*.

#### **2.5.5.2.1. Dispersión.**

La dispersión se produce por la no homogeneidad del material bajo ensayo; o sea, la presencia de pequeñas heterogeneidades, que actúan como focos dispersores. Por todas estas razones, es posible que se produzcan señales pequeñas, numerosas, que puedan "camuflajear" las indicaciones de discontinuidades reales. Estas pequeñas heterogeneidades, pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- Inclusiones tales como, las inclusiones no metálicas en los aceros, o poros.
- Heterogeneidades genuinas o también naturales, tal como la porosidad en materiales sinterizados.
- Constituyentes precipitados de naturaleza distinta, tal como el grafito en las fundiciones grises.
- Fases en la estructura cristalina de los metales, con diferentes estructuras y composición.
- Aunque la estructura cristalina esté constituida por una sola fase, sí los granos están orientados al azar y poseen distintas propiedades elásticas en diferentes direcciones, constituirán una heterogeneidad para el haz ultrasónico. Esta característica se conoce con el nombre de anisotropía.
- En un material con un tamaño de grano basto, comparado con la longitud de onda, la dispersión se producirá de acuerdo con las siguientes consideraciones de tipo geométrico-óptico; En un límite de grano oblicuo, la onda se desdoblará en varios tipos de ondas reflejadas y transmitidas. Este proceso se repetirá para cada onda en el siguiente límite de grano, de manera que el haz ultrasónico, original, se dividirá constante y sucesivamente en ondas parciales.
- Normalmente, con el margen de frecuencia utilizado en los ensayos no destructivos de materiales, el tamaño de grano es menor que la longitud de onda. Bajo éstas condiciones, se produce la dispersión no por desdoblamiento de tipo geométrico, como el descrito, sino al igual que la luz de un faro se dispersa en las gotas pequeñas de agua de la niebla.

Concluyendo, la dispersión, es mucho más perturbadora, ya que, en el método de pulso-eco, no sólo reduce la amplitud del eco de la discontinuidad y la del eco de fondo, sino que; además, produce numerosos ecos parásitos con diferentes recorridos, llamados "**grama o ruido de la señal**", en los que los ecos verdaderos pueden quedar enmascarados. Estas indicaciones falsas no se pueden contrarrestar aumentando la amplificación, ya que el efecto se incrementaría simultáneamente.

#### **2.5.5.2.2. Absorción.**

La absorción es causada por la conversión de energía mecánica en calor. En materiales que se encuentran a temperaturas superiores al cero absoluto, la vibración de las partículas producirá calor.

Con la propagación de la onda en el material, se producirá la vibración de partículas que, excitarán a las siguientes y así sucesivamente; la transmisión de las oscilaciones en el medio producirá éstos aumentos de temperatura. El efecto de la temperatura, combinada con la estructura policristalina de los materiales, y la orientación al azar de los granos, atenuará la señal ultrasónica.

Se puede explicar la absorción, de forma elemental, como un efecto de frenado de la oscilación de las partículas, lo cual explicaría también porque una oscilación rápida pierde más energía que una oscilación lenta. La absorción aumenta, generalmente, con la frecuencia, pero en menor grado que la dispersión.

En conclusión, la absorción pura debilita la energía transmitida o la amplitud del eco, tanto de la discontinuidad como de la pared de fondo. Para contrarrestar éste efecto, hay que incrementar la amplificación o, también, recurrir al empleo de frecuencias más bajas.

### 2.5.6. Ley de la atenuación (medición de la atenuación).

Además de estos factores causantes de pérdidas de energía, existen otros tales como; pérdidas de energía en el medio acoplante, dispersión debida a la rugosidad superficial y pérdidas por divergencia del haz. Todos estos factores, productores de pérdidas, son agrupados como factores de atenuación. La Ley de Variación de la Presión Acústica de una onda plana, que decrece exclusivamente por efecto de la atenuación, es una función de carácter exponencial.

La atenuación se mide en decibeles (**dB**), una unidad comparativa logarítmica. Esto es bien conocido por los electrónicos y definido como:

$$a \text{ [dB]} = 20 \log \frac{U_1}{U_2}$$

U= Voltajes eléctricos

a= Atenuación de la respuesta de ganancia.

Así, la altura de las indicaciones de los ecos en la pantalla del osciloscopio son proporcionales a los voltajes de los impulsos de los ecos, lo que puede ser escrito como:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

A<sub>1</sub> = Altura inicial del eco.

A<sub>2</sub> = Altura final del eco.

de allí:

$$\Delta db = 20 \times \log \frac{A_2}{A_1}$$

Se puede ver que solamente comparando la altura de dos ecos será posible obtener evidencias de la atenuación del sonido. Tal estimación es posible si hay posibilidades de comparación. Con una relación de altura de dos ecos  $A_2/A_1 = 2/1 = 2$  encontramos:

$$\Delta db = 20 \log 2 = 20 \times 0,3 = 6 \text{ dB}$$

Esto significa que una reducción de **6 dB** en la altura del eco, corresponde a un decremento a la mitad de su altura.

La atenuación del sonido dentro de un material por sí mismo no es, a menudo de interés intrínseco. Sin embargo, las características y las condiciones de carga naturales se pueden relacionar con la atenuación. La atenuación sirve, a menudo, como herramienta de medición que conduce a la formación de teorías para explicar el fenómeno físico o químico que disminuye la intensidad ultrasónica.

El cambio de la amplitud de una onda plana que decae se puede expresar como:

$$A = A_o \cdot e^{-\alpha z}$$

En esta expresión “ $A_o$ ” es la amplitud de la onda propagada en algún medio. La amplitud “ $A$ ” es la amplitud reducida después de que la onda ha viajado una distancia “ $Z$ ” desde su localización inicial. La cantidad “ $\alpha$ ” es el coeficiente de atenuación del viaje de la onda en la dirección “ $Z$ ”. Las dimensiones de “ $\alpha$ ” son neperiano/longitud, donde un neperiano es una cantidad sin unidades. El término “ $e$ ” es la constante de Napier que es aproximadamente igual a **2,71828**.

Las unidades del valor de la atenuación en neperiano/longitud se pueden convertir a decibeles/longitud dividiéndose por **0,11513**. Los decibeles son una unidad más común al relacionar las amplitudes de dos señales.

La atenuación es generalmente proporcional al cuadrado de la frecuencia. Los valores de la atenuación se dan a menudo para una sola frecuencia, o se puede dar un valor de atenuación promedio sobre muchas frecuencias. También, el valor real del coeficiente de atenuación para un material dado, es altamente dependiente de la manera con la cual el material es manufacturado. Así, los valores de la atenuación dan solamente una indicación aproximada de la misma y no se debe confiar en ellos automáticamente. Generalmente, un valor confiable de la atenuación puede ser obtenido solamente determinando la atenuación experimental para el material particular que es utilizado.

La atenuación se puede determinar evaluando las múltiples reflexiones de pared posterior consideradas en la típica presentación A-scan. El número de decibeles entre dos señales adyacentes se mide y este valor se divide por el intervalo de tiempo entre ellas. Este cálculo produce un coeficiente de

atenuación en decibeles por unidad de tiempo “ $U_t$ ”. Este valor se puede convertir a neperiano/longitud con la ecuación siguiente:

$$\alpha = \frac{0,11513}{V} U_t$$

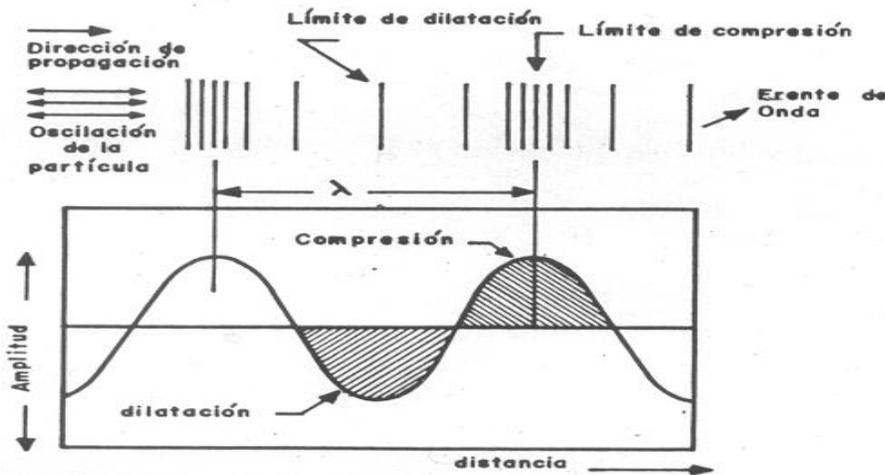
Este valor donde “ $v$ ” es la velocidad del sonido en metros por segundo y “ $U_t$ ” esta en decibeles por segundo.

### 2.5.7. Modos o tipos de ondas.

Las partículas de un medio en el que se propaga una onda ultrasónica experimentan diversos desplazamientos, lo que da lugar a diferentes tipos de ondas. Desde el punto de vista de los ensayos no destructivos, las más importantes son: **longitudinales o de compresión, transversales o de corte, superficiales o de Rayleigh y de placa o de Lamb.**

#### 2.5.7.1. Ondas longitudinales o de compresión.

Se caracterizan porque los desplazamientos de las partículas son paralelos a la dirección de propagación del ultrasonido, creando zonas de compresión y de dilatación, separadas entre sí media longitud de onda dentro del material en el que se propagan.

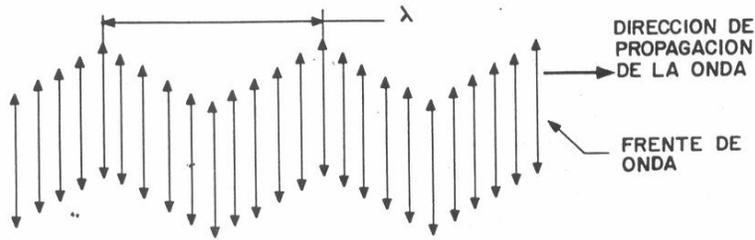


**FIGURA 30.** Representación esquemática de una onda longitudinal de compresión.

Pueden transmitirse a través de sólidos, líquidos y gases; su velocidad de viaje es la más alta respecto de los otros modos. Prácticamente, todos los transductores emiten ondas longitudinales a partir de las cuales se generan otras de diferentes tipos, ya sea por un ángulo de incidencia diferente al normal, o bien, por la geometría del material sujeto a inspeccionar.

### 2.5.7.2. Ondas transversales o de corte.

Son denominadas de esta manera, debido a que el movimiento de las partículas es transversal a la dirección de propagación, para lo cual, es necesario que cada partícula exhiba una gran fuerza de atracción hacia sus vecinas, con lo que al moverse hacia atrás y hacia delante provoquen la oscilación de las demás.



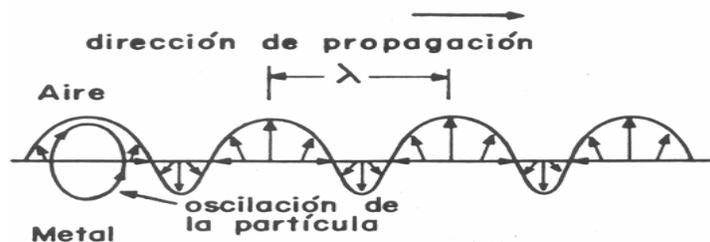
**FIGURA 31.** Representación esquemática de una onda transversal o de corte.

Los gases y los líquidos no tienen la propiedad para transmitir ondas transversales, pues sus moléculas ofrecen poca resistencia al desplazamiento transversal, y por lo tanto, no existen vínculos elásticos que las ligen a su posición cero. En los casos prácticos de inspección solo se pueden alcanzar distancias de propagación en los cuerpos sólidos.

Una onda de corte viaja aproximadamente a la mitad de la velocidad de una onda longitudinal cuando se desplazan en el mismo material, y por lo tanto tiene longitudes de onda más cortas que las ondas longitudinales de la misma frecuencia, lo que las hace más sensibles a los reflectores pequeños. Por tales características, se utiliza en la inspección de uniones soldadas.

### 2.5.7.3. Ondas de superficie o de Rayleigh.

Son aquellas que se desplazan sobre la superficie del material y penetran a una profundidad máxima de una longitud de onda, su trayectoria es elíptica, su velocidad es de aproximadamente el 90% de la velocidad de las de corte.



**FIGURA 32.** Representación esquemática de una onda de superficie.

Son muy sensibles y se atenúan cuando existe un segundo medio en su trayectoria; por ejemplo, un líquido o un sólido en contacto con la superficie. En la práctica, se emplean para detectar discontinuidades en superficies poco rugosas.

#### 2.5.7.4. Ondas de placa o de Lamb.

Son aquellas que se generan cuando un material muy delgado se somete a una onda de superficie, se clasifican en; simétricas o de dilatación y asimétricas o de flexión.

La velocidad de propagación de las ondas de Lamb no se puede considerar como una constante del material, ya que depende de su espesor, de la frecuencia, ángulo de incidencia, del modo y tipo de onda.

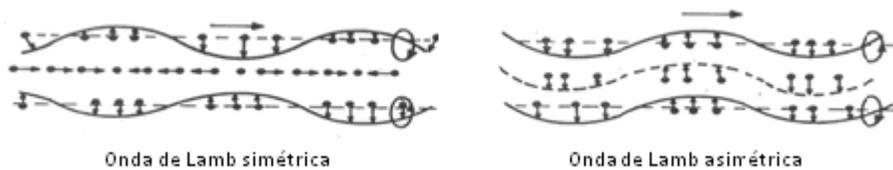


FIGURA 33. Representación esquemática de onda de Lamb simétrica y asimétrica.

#### 2.5.8. Transferencia de energía de un medio a otro.

La propagación de una onda se caracteriza por el transporte de energía y no de masa. La Ley de la Energía nos dice que ésta no se crea ni se destruye, sólo se transforma. Esto implica que, cuando a un cuerpo o materia que se encuentra en estado de equilibrio elástico se le aplica una cierta cantidad de energía, las partículas superficiales transmitirán la energía recibida a las partículas vecinas y éstas, a su vez, a las siguientes, produciéndose así, la propagación de la energía exterior a través de todas las partículas del medio.

Entonces en la interfase entre dos materiales (en el caso de ultrasonido se deben tomar en cuenta las interfases sólido/ sólido y líquido /sólido), ocurrirá que la energía incidente sobre un cuerpo no será transmitida en su totalidad, sino que una cierta porción será reflejada por la superficie límite. Entonces, la energía incidente será igual a la suma de la energía transmitida más la energía reflejada:

$$E_i = E_t + E_r$$

Donde;

$E_i$  = Energía incidente.

$E_t$  = Energía transmitida.

$E_r$  = Energía reflejada.

### 2.5.8.1. Impedancia acústica

El sonido viaja a través de los materiales bajo influencia de las fuerzas de compresión. Esto debido a que las moléculas o los átomos de un sólido están limitados elásticamente uno a otro, el exceso de presión da lugar a una onda que se propaga a través del sólido.

La *impedancia acústica* (**Z**) es la resistencia que opone un material a la propagación del sonido y esta definida como el producto de su densidad (**ρ**) y la velocidad acústica (**V**). Puede ser calculada mediante dos ecuaciones diferentes. La primera, la define como el producto de la densidad del material por su velocidad acústica, así:

$$Z = \rho * V$$

Donde;

**ρ** = Densidad (Kg/m<sup>3</sup>).

**V** = Velocidad máxima de vibración en el material (m/s).

**Z** = Impedancia acústica (Kg/m<sup>2</sup>\*s).

La segunda, la define como la relación existente entre la presión acústica y la velocidad máxima de vibración, así:

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

Donde;

**V** = Velocidad máxima de vibración en el material (m/s).

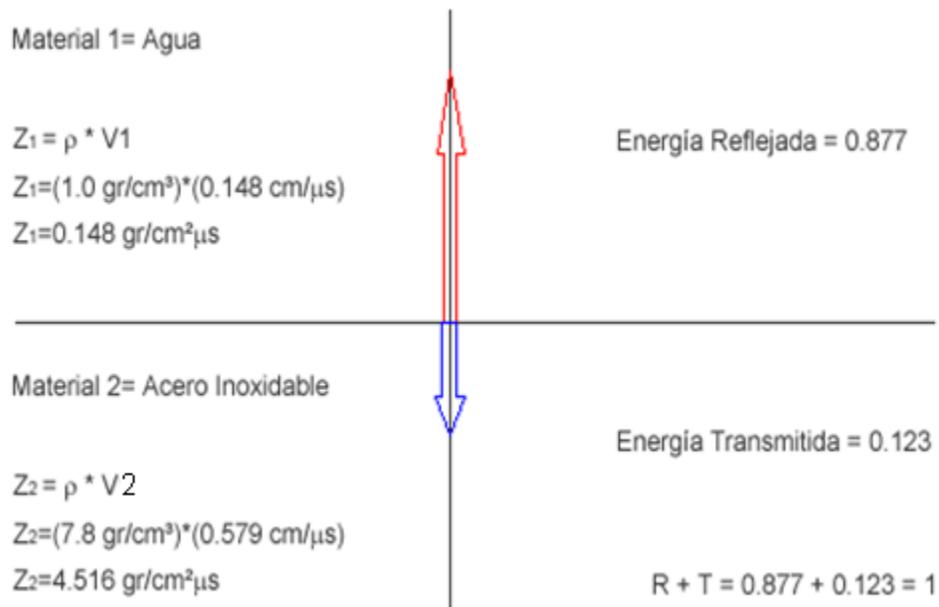
**P**= Amplitud del esfuerzo producido por las ondas ultrasónicas.

La impedancia acústica (también denominada impedancia de la onda acústica o impedancia acústica específica) es la resistencia que se opone a la vibración de la onda. Si un medio posee una impedancia baja, sus elementos de masa vibrarán a gran velocidad, con sólo un pequeño cambio de presión acústica; es decir, el medio ofrecerá poca resistencia a las deformaciones elásticas causadas por la onda. Si, por el contrario, la impedancia es elevada, sus elementos de masa vibrarán lentamente, aunque la presión acústica sea elevada, ya que el medio ofrece gran resistencia a las deformaciones elásticas.

*La impedancia acústica* es importante en:

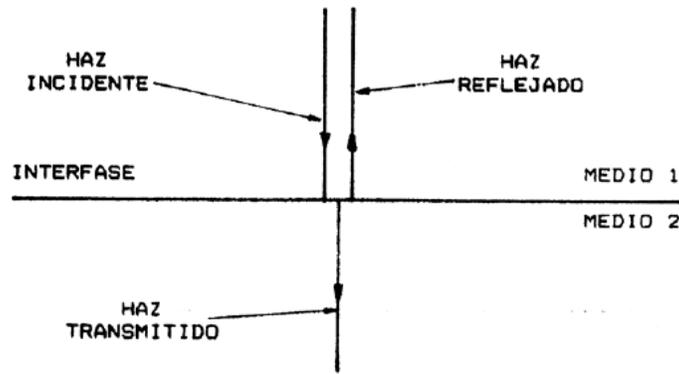
1. La determinación de la transmisión y la reflexión acústicas en el límite de dos materiales que tienen diversas impedancias acústicas.
2. El diseño de transductores ultrasónicos.
3. La determinación de la absorción del sonido en un medio.

El siguiente es un ejemplo de un cálculo de la impedancia acústica para agua y acero inoxidable, conociendo su densidad ( $\rho$ ) y la velocidad acústica ( $V$ ). También muestra como un cambio en la impedancia afecta la cantidad de energía acústica que se refleja y se transmite. Los valores de la energía reflejada y transmitida son las cantidades fraccionarias del incidente total de la energía en la interfaz. Observe que la cantidad fraccionaria de energía transmitida más la cantidad fraccionaria de energía reflejada es igual a uno. El cálculo usado para llegar a estos valores será discutido más adelante.



### 2.5.9. Comportamiento de las ondas ultrasónicas en superficies límites.

El análisis de una onda en un medio ilimitado, sólo es posible teóricamente, ya que, en la práctica, cualquier material presenta una superficie límite o contorno, con lo que la propagación de la onda se altera. Sí el material está rodeado de un espacio vacío, no se puede transmitir ningún tipo de onda acústica, ya que ello requeriría la presencia de partículas de material. En un contorno libre de éste tipo, la onda retorna de algún modo. Si la superficie límite es suave, según un fenómeno de reflexión, si es rugosa, según un fenómeno de dispersión. En éste último caso, las irregularidades de la superficie se deben medir en términos de longitud de onda. Sabemos que el límite entre dos materiales se denomina interfase, y que en la misma ocurre como se dijo anteriormente, la energía incidente es igual a la suma de las energías transmitida y reflejada.



**FIGURA 34.** Diagrama ilustrativo de la transmisión y reflexión de un haz ultrasónico con incidencia normal.

Las cantidades de energía transmitida y reflejada, pueden ser calculadas por medio de la intensidad del haz ultrasónico, y se denominan coeficientes de transmisión y reflexión:

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

Donde;

**T** = Coeficiente de transmisión de la intensidad del haz.

**R** = Coeficiente de reflexión de la intensidad del haz.

**I<sub>i</sub>** = Intensidad del haz sonoro incidente.

**I<sub>T</sub>** = Intensidad del haz sonoro transmitido.

**I<sub>R</sub>** = Intensidad del haz sonoro reflejado.

**Z<sub>1</sub>** = Impedancia acústica del medio 1.

**Z<sub>2</sub>** = Impedancia acústica del medio 2.

El balance de energía, correspondiente al haz ultrasónico mostrado en la figura 34, expresado en función de la intensidad, es:

$$\mathbf{I_i = I_R + I_T}$$

La relación existente, entre los coeficientes de reflexión y transmisión de la energía o la intensidad, será:

$$\mathbf{R + T = 1}$$

De la misma forma, es posible obtener valores de transmisión y reflexión de la presión acústica, así:

$$T' = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

Donde;

**T'** = Coeficiente de transmisión de la presión acústica.

**R'** = Coeficiente de reflexión de la presión acústica.

**P<sub>i</sub>** = Presión acústica incidente.

**P<sub>t</sub>** = Presión acústica transmitida.

**P<sub>r</sub>** = Presión acústica reflejada.

El balance de la presión acústica, en contraste con el de la energía o el de la intensidad, será:

$$P_i + P_r = P_t$$

Y de la misma forma, la relación entre los coeficientes de reflexión y transmisión de la presión acústica, será:

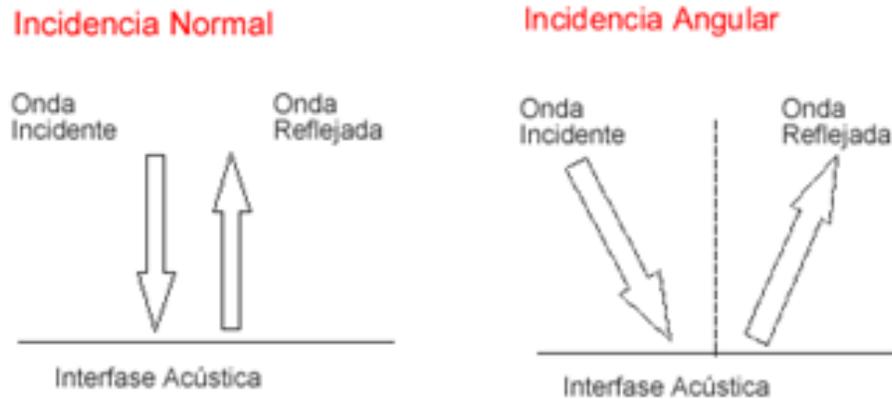
$$1 + R' = T'$$

### 2.5.9.1. Reflexión.

Es el cambio de dirección de una onda, que al estar en contacto con la superficie límite entre dos medios, ésta regresa al medio inicial.

Comúnmente encontraremos dos situaciones que se relacionan con la reflexión;

- Cuando la onda que incide es perpendicular a la interfase acústica (incidencia normal), la reflexión se presentará hacia la fuente generadora, en la misma dirección pero con el sentido opuesto.
- Cuando la onda incidente es oblicua a la interfase acústica (incidencia angular), la onda se refleja con un ángulo igual al de incidencia.



**FIGURA 35.** Incidencia normal y angular.

### 2.5.9.2. Refracción.

Cuando una onda ultrasónica pasa a través de una interfaz entre dos materiales a un ángulo oblicuo (que no es recto), y los materiales tienen diversos índices de refracción, se producen ondas reflejadas y ondas refractadas.

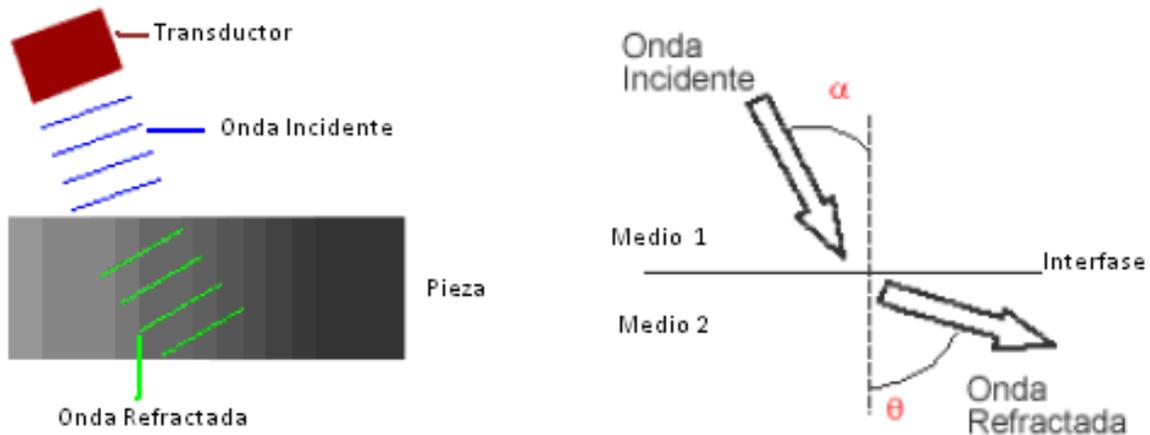
Esto también ocurre con la luz, cuando los objetos que se ven a través de una interfaz parecen ser cambiados del lugar donde realmente están. Una buena manera de visualizar cómo la luz y el sonido se refractan, es encender una linterna encima de un recipiente con agua, para observar el ángulo de refracción con respecto al ángulo incidente.



**FIGURA 36.** Refracción en un vaso con agua.

La refracción ocurre en una interfaz debido a las diversas velocidades de las ondas acústicas dentro de los dos materiales. La velocidad del sonido en cada material es determinada por sus características físicas (módulos elásticos y densidad) para ese material.

En la siguiente figura se pueden ver una serie de ondas planas que viajan en un material y se incorporan a un segundo material que tiene una velocidad acústica más alta. Por lo tanto, cuando la onda encuentra la interfaz entre estos dos materiales, la porción de la onda en el segundo material se está moviendo más rápidamente que la porción de la onda en el primer material. Se puede ver que esta característica hace que la onda se doble.



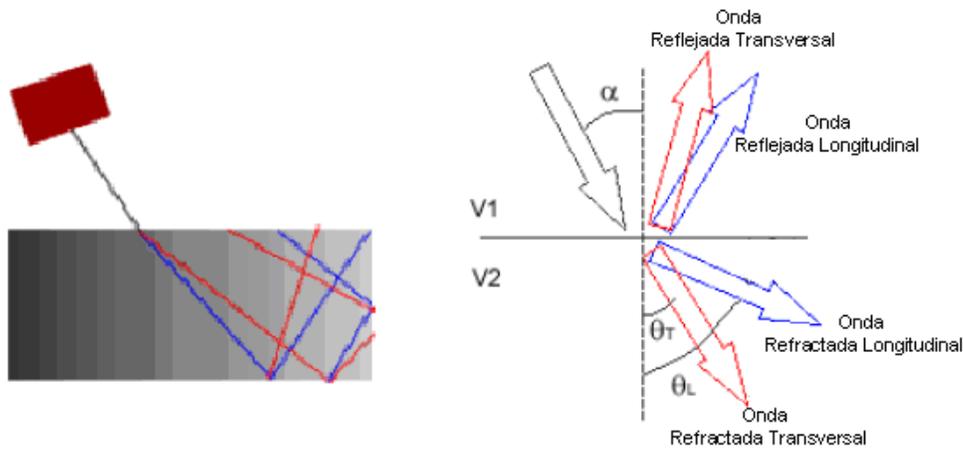
**FIGURA 37.** Refracción de ondas acústicas en un material de ensayo.

### 2.5.9.3. Conversión de modo.

Cuando el sonido viaja en un material sólido, una forma de energía de la onda se puede transformar en otra. Por ejemplo, cuando las ondas longitudinales golpean una interfaz de manera angular, algo de la energía puede causar el movimiento de la partícula en dirección transversal para comenzar una onda de corte (transversal). La conversión de modo ocurre cuando una onda encuentra una interfaz entre los materiales de diversas impedancias acústicas y el ángulo incidente no es normal a la interfaz. En la figura 38 se puede ver como ocurre la conversión de modo cada vez que la onda encuentra una interfaz en ángulo, las señales ultrasónicas pueden llegar a ser confusas ocasionalmente.

A partir de la incidencia de una onda longitudinal con un ángulo oblicuo se crearán:

- Una onda longitudinal reflejada.
- Una onda longitudinal refractada.
- Una onda transversal reflejada.
- Una onda transversal refractada.



**FIGURA 38.** Conversión de modo de las ondas acústicas en un material de ensayo.

En la sección anterior, se precisó que cuando las ondas acústicas pasan a través de una interfaz entre dos materiales que tienen diversas velocidades acústicas, la refracción ocurre en la interfaz. **Cuanto más grande es la diferencia de velocidades acústicas entre los dos materiales, se refracta más el sonido.** Note que la onda de corte no se refracta tanto como la onda longitudinal. Esto ocurre porque las ondas de corte viajan más lentamente que las ondas longitudinales.

Por lo tanto, la diferencia de velocidades entre la onda longitudinal incidente y la onda de corte no es tan grande, como lo es entre la onda incidente y las ondas longitudinales refractadas. También observe que cuando una onda longitudinal se refleja dentro del material, la onda de corte se refleja a un ángulo más pequeño que la onda longitudinal reflejada. Esto es también debido al hecho de que la velocidad de corte es menor que la velocidad longitudinal dentro de un material dado.

#### 2.5.9.4. Ley de Snell.

*La Ley de Willebrord Snell of Leyden*, también conocida como *la Ley de la Óptica*, se cumple en lo que respecta a la transmisión del sonido. La Ley de Snell establece que:

El seno del ángulo de incidencia es igual al seno del ángulo de reflexión, o sea:

$$\mathbf{Sen \alpha_i = Sen \alpha_r}$$

ó bien:

$$\mathbf{\alpha_i = \alpha_r}$$

Donde;

$\alpha_i$  = Ángulo de incidencia.

$\alpha_r$  = Ángulo de reflexión.

La relación entre los senos de los ángulos de incidencia y refracción, es directamente proporcional a la relación entre las velocidades acústicas de los medios en interfase, según la ecuación:

$$\frac{\text{Sen } \alpha}{V_1} = \frac{\text{Sen } \theta}{V_2} \rightarrow \frac{\text{Sen } \alpha}{\text{Sen } \theta} = \frac{V_1}{V_2}$$

Donde;

$\alpha$  = Ángulo de incidencia.

$\theta$  = Ángulo de refracción.

$V_1$  = Velocidad acústica del medio 1.

$V_2$  = Velocidad acústica del medio 2.

#### 2.5.9.5. Ángulos críticos.

Los ángulos críticos son aquellos que producen tanto la onda longitudinal refractada (*primer ángulo crítico*), como la onda transversal refractada (*segundo ángulo crítico*), en la superficie límite ó interfase.

En el caso presentado en la figura 38, podemos observar que en el medio 2 se encuentran dos ondas ultrasónicas, una refractada longitudinal y otra refractada transversal. ***En la realidad, es imprescindible que solamente una onda ultrasónica se propague en la pieza a ensayar***, de manera de no crear confusión entre las señales detectadas en la pantalla, por lo que debe buscarse la forma de eliminar uno de las dos ondas.

##### 2.5.9.5.1. Primer ángulo crítico.

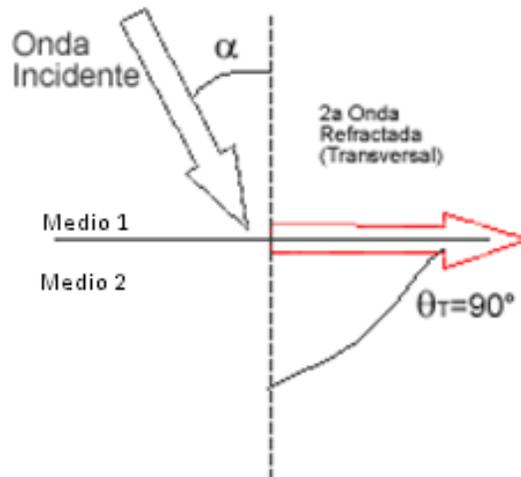
A medida que aumenta el valor del ángulo de incidencia ( $\alpha$ ), automáticamente aumentarán los valores de los ángulos de reflexión y refracción, según la Ley de Snell hasta que la onda refractada longitudinal se propague en la superficie límite. El ángulo de incidencia ( $\alpha$ ), para el cual se cumple que el ángulo de la onda refractada longitudinal ( $\theta_L$ ) sea igual a  $90^\circ$ , se conoce como "***Primer Angulo Crítico***".



**FIGURA 39.** Primer ángulo crítico.

#### 2.5.9.5.2. Segundo ángulo crítico.

Con aumentos progresivos del ángulo de incidencia ( $\alpha$ ) por encima del *primer ángulo crítico*, llegaremos al caso en el que la onda refractada transversal se propague también en la superficie límite o interfase, es decir; que el ángulo de la onda refractada transversal ( $\theta_T$ ) sea igual a  $90^\circ$ . Esto es conocido como “*Segundo Ángulo Crítico*”.



**FIGURA 40.** Segundo ángulo crítico.

Esta es la forma en que se desarrollan las ondas de superficie. Es de hacer notar que, para valores del ángulo de incidencia que se encuentren entre los dos ángulos críticos, solamente se transmitirán ondas transversales, lo que hace posible la eliminación de la onda refractada longitudinal en el segundo medio.

### 2.5.9.6. Dispersión, difracción, interferencia.

Si una onda sónica encuentra un obstáculo, por ejemplo un medio con diferentes propiedades acústicas, pueden ocurrir varios fenómenos, dependiendo del tamaño del obstáculo. Los siguientes tres casos serán apuntados.

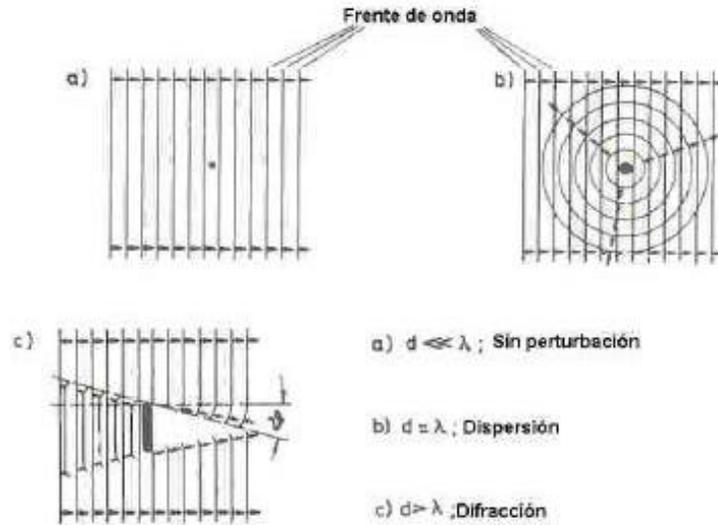


FIGURA 41. Dispersión y difracción de ondas en obstáculos.

a) El obstáculo es pequeño comparado con la longitud de onda, en este caso, aquel no interfiere la propagación de la onda y ésta viaja como si el obstáculo no estuviera presente.

b) Si el tamaño del obstáculo es del mismo orden de magnitud que el de la longitud de onda, el proceso de propagación del haz, es débilmente interferido, aunque, algo de energía de la onda es absorbida. Esta energía se extenderá como una nueva onda esférica en todas direcciones, con el obstáculo como punto central. Este proceso es llamado "*dispersión*".

c) Si tenemos un obstáculo más grande que la longitud de onda, y si además asumimos que la impedancia acústica del obstáculo difiere mucho del de los alrededores, se producirá una reflexión de la onda en el mismo. En efecto, no habrá onda de propagación detrás de él (sombra de la onda), pero esta sombra será cada vez menor con el incremento de la distancia desde el obstáculo. Esto ocurre porque las partes de la onda que corren a lo largo de los bordes del obstáculo son algo curvadas (difractadas) y corren oblicuamente hacia el interior de la sombra. De la misma forma el haz de onda reflejado se abre hacia el frente. Este proceso es llamado "*difracción*".

Por supuesto, estos procesos no son aislados unos de otros, más bien ocurren con una transición gradual, dependiendo del tamaño del obstáculo. Así se produce "difracción" y "dispersión" en un obstáculo de tamaño medio.

### 3. EQUIPOS.

#### 3.1. Instrumentación básica.

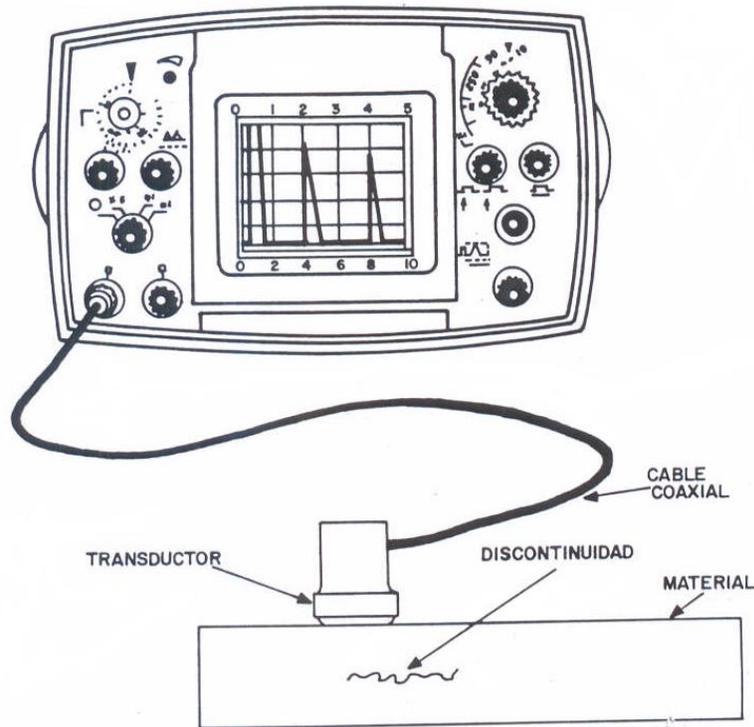


FIGURA 42. Instrumentación básica.

Los elementos esenciales del sistema son:

- Equipo electrónico de ultrasonido.
- Cable coaxial y terminales.
- Transductor. **(Descrito en el capítulo 2).**
- Material a inspeccionar.

#### 3.1.1. Equipo electrónico de ultrasonido.

En esencia todos los equipos ultrasónicos cumplen la función de generar y recibir señales eléctricas, las mismas que son medidas e interpretadas con ayuda de distintos accesorios que proporcionan algunos modelos diversos. Básicamente en el mercado existen detectores de fallas y medidores de espesores, con diferentes presentaciones y funciones que facilitan el trabajo de interpretación del inspector, sin embargo, todos los equipos cuentan con las mismas funciones básicas, para configurar los parámetros más importantes de la inspección como son la frecuencia, el rango, entre otros. Los instrumentos ultrasónicos son equipos de comparación contra un **patrón de calibración**, por lo tanto, un instrumento ultrasónico se debe calibrar antes de ser utilizado.

La mayoría de los instrumentos ultrasónicos, considerados para utilizarse en la industria, son unidades que operan por la técnica pulso-eco con presentación tipo "A-scan", los cuales, incluyen una gran variedad de configuraciones que difieren en cuanto al grado de complejidad, portabilidad, tipo de pantalla, capacidad de almacenamiento de datos en la memoria integrada, etc.

En el funcionamiento de un instrumento ultrasónico se incluye la determinación del tiempo de aparición y de la amplitud de la señal; como accesorios que pueden encontrarse integrados se puede mencionar a **la curva DAC** electrónica, compuertas, monitor, medición de espesores digitalmente y cálculos matemáticos de distancias, también en forma digital, cuando se utiliza haz angular.

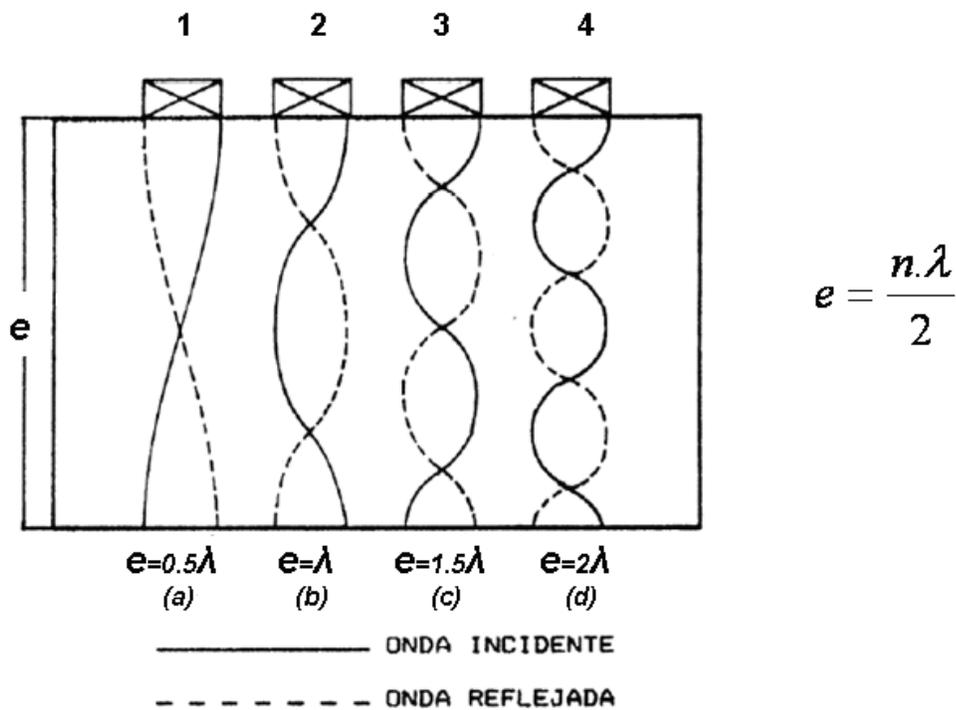
Los equipos ultrasónicos en general operan en base a amplitud contra tiempo; es decir, la amplitud de la señal contra el tiempo que toma en ser detectada. La amplitud de la señal puede ser controlada o ajustada mediante arreglos electrónicos. El tiempo puede ser traducido a distancia mediante cálculos, utilizando, para cada material, las velocidades de propagación de las ondas. Ahora bien, un ensayo puede ser efectuado partiendo de varios sistemas (equipos), entre los cuales se encuentran; ***Resonancia, Transmisión y Pulso-Eco.***

Los sistemas de resonancia y pulso-eco operan por reflexión del haz ultrasónico, mientras que el sistema de transmisión opera bajo el principio de transparencia o sombra. Por esta razón, las magnitudes características a medir mediante la aplicación de estos sistemas son:

- Frecuencia de resonancia.
- Intensidad acústica.
- Tiempo de recorrido del haz ultrasonido.

#### **3.1.1.1. Resonancia.**

El sistema de resonancia se basa en que cada espesor tiene una frecuencia fundamental de resonancia. Cuando se aplica esa frecuencia en forma de haz continuo de sonido a la pieza de ensayo, se crean ondas estacionarias dentro de la pieza. Estas ondas estacionarias causan un incremento en la amplitud de la señal de recepción. Si en una muestra de superficies paralelas, de determinado espesor "**e**", se propaga un haz ultrasónico de excitación continua y de amplio espectro de frecuencias, las correspondientes oscilaciones cuya semilongitud de onda sea un submúltiplo del espesor de la pieza, se reforzarán por superponerse en fase, debilitándose las restantes, dando lugar a un fenómeno de resonancia, es decir, a la formación de ondas estacionarias. En consecuencia, las oscilaciones características se podrán definir por el número de semilongitudes de onda contenidas en el espesor de la pieza; por ejemplo, la oscilación característica fundamental o primera, como la correspondiente a una semilongitud de onda por espesor (figura 43 a) y la oscilación característica de orden "**n**", como la correspondiente a "**n**" semilongitudes de onda (por ejemplo, de orden 2, 3 y 4, figuras 43 b, c y d respectivamente).



**FIGURA 43.** Sistema de resonancia.

Mediante un control de generación, es posible variar la frecuencia del oscilador dentro de un rango de selección de frecuencias. Con variaciones de la frecuencia, la longitud de onda también variará, a una frecuencia dada, una gran cantidad de puntos de resonancia pueden ocurrir, según la siguiente ecuación:

$$f_n = \frac{n \cdot V}{2 \cdot e}$$

Donde;

$f_n$  = Frecuencia de resonancia.

$n$  = Resonancia de frecuencia armónica (múltiplo exacto) 1, 2, 3, 4, etc.

$V$  = Velocidad acústica longitudinal.

$e$  = Espesor del material.

En otras palabras, la resonancia ocurre cuando el espesor del material es igual a un número entero en el que se repite la mitad de la longitud de onda.

### 3.1.1.2. Transmisión.

En el sistema de ensayo por transmisión, se requiere la utilización de dos palpadores o dos cristales, donde un cristal actúa solamente como emisor y el otro como receptor. Tanto la emisión, como

la recepción pueden ser continuas; así como pueden ser usados, al igual que en el sistema de pulso-eco, pulsos ultrasónicos de corta duración. Los palpadores deben ser alineados de forma tal, que la emisión ultrasónica se transmita a través del material y sea entonces detectada por el palpador receptor.

Estos sistemas están basados en el efecto de sombra que un obstáculo (discontinuidad dentro de la pieza) produce al ser interpuesto por un haz ultrasónico.

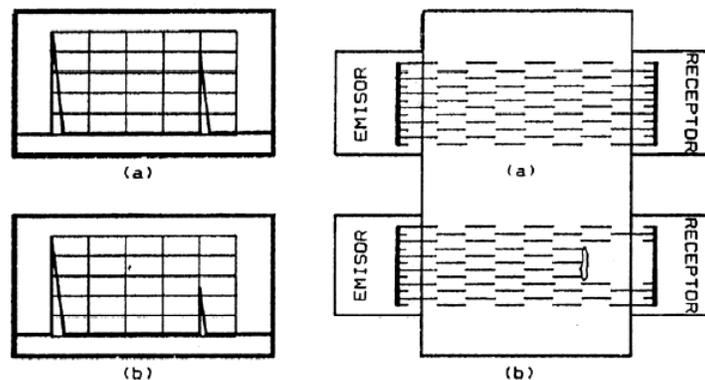
En principio, los equipos diseñados para operar según los sistemas de transparencia o de sombra, realizan sólo la medida de “*La Intensidad Acústica*”, si bien aquellos que miden conjuntamente la intensidad acústica y el tiempo de recorrido son perfectamente adaptables a éste fin.

### a) Intensidad acústica.

Este método, el más antiguo de todos los métodos de ensayo de materiales por ultrasonido, mide la intensidad acústica de un haz ultrasónico de excitación continua, que atraviesa el material.

En realidad, no es la intensidad acústica lo que se mide, sino la amplitud de la presión acústica cuando se utiliza un receptor piezoeléctrico. Si las características del equipo y del amplificador son lineales, la indicación será proporcional a la raíz cuadrada de la intensidad. No obstante, se sigue manteniendo la designación de método de intensidad, ya que no siempre se utilizan receptores piezoeléctricos y, además, porque algunos equipos realizan electrónicamente la raíz cuadrada de la señal, manteniéndose así, proporcional a la intensidad acústica. En realidad, se ha venido manteniendo desde antes la designación de intensidad por su analogía con la radiología industrial.

Por su propia naturaleza, se utiliza principalmente por transmisión, es decir, con dos palpadores, uno de los cuales actúa como emisor y el otro, coaxialmente alineado al lado opuesto de la pieza, como receptor. En la figura 44 se presenta el esquema de un equipo basado en éste principio. Calibrado el equipo en una zona libre de discontinuidades y considerando la intensidad (o la presión acústica), recibida como 100 % (figura 44 a), si el haz es interceptado por una discontinuidad, la intensidad (o la presión acústica) disminuirá proporcionalmente a la superficie del obstáculo (figura 44 b).



**FIGURA 44.** Medida de la intensidad acústica por transmisión.

## **b) Intensidad acústica y tiempo de recorrido.**

Los equipos de medida de intensidad acústica y tiempo de recorrido, están concebidos propiamente para ser aplicados por el método de pulso-eco. No obstante, se pueden adaptar para operar por transparencia, disponiendo los palpadores de emisión y recepción separados, bien por transmisión, por reflexión o por conducción.

### **3.1.1.3. Pulso-eco.**

Los sistemas de ensayo por pulso-eco, como su mismo nombre lo indica, son; la emisión de pulsos ultrasónicos de corta duración, pero a una frecuencia definida. Están basados en el efecto del eco que un reflector produce al ser encontrado por un haz ultrasónico. En estos sistemas, el oscilador receptor, separado o formando una unidad con el emisor, recoge el eco del reflector transformándolo en la indicación correspondiente, por lo que opera siempre por reflexión.

Dentro de estos sistemas cabe distinguir los que miden solamente el tiempo de recorrido del haz ultrasónico, limitados a aplicaciones concretas de metrología, de los que miden la intensidad acústica y el tiempo de recorrido conjuntamente, para aplicaciones más extendidas en los campos de la defectología, caracterización e igualmente, metrología. Así como los sistemas de transparencia o sombra admiten el sistema de excitación continua, la formación de ondas estacionarias y la superposición continua de señales impedirían, en el presente caso, la medida del tiempo de recorrido y la consiguiente obtención de indicaciones propias. Se hace preciso recurrir, pues, al sistema de excitación por impulsos, de ahí la denominación de pulso - eco de éstos sistemas.

## **a) Tiempo de recorrido.**

Los equipos diseñados solamente para medir el tiempo que tarda el impulso acústico en recorrer un espesor dado de material, resultan de la simplificación de los que miden la intensidad y el tiempo de recorrido. En aquel caso, se omite la medida de la intensidad acústica y la indicación del tiempo de recorrido se suele representar, traducida directamente a espesor de material, por un indicador de sistema digital.

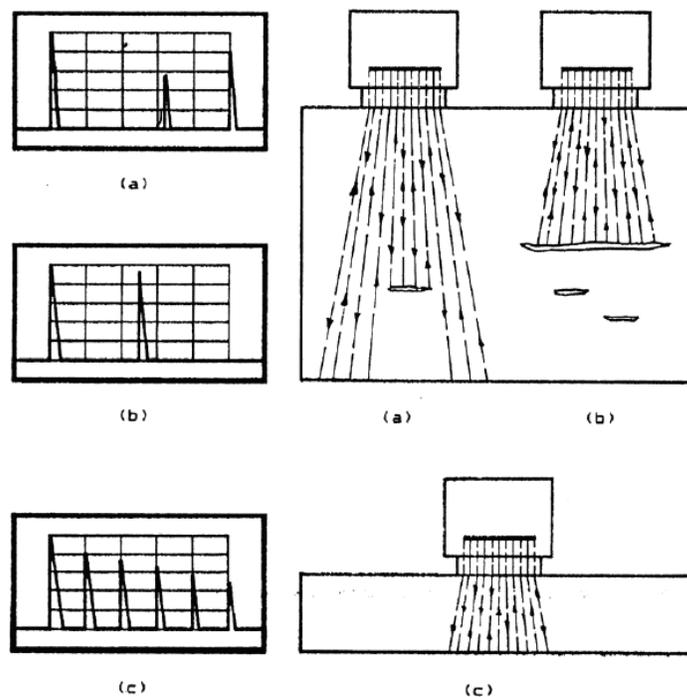
Algunos equipos, en lugar de medir el espesor, determinan la velocidad acústica aunque son menos utilizados. En la actualidad, estos equipos para medición de espesores por ultrasonido han adquirido un gran desarrollo, y su aplicación se ha extendido a numerosas industrias, especialmente a aquellas que, debido a problemas de corrosión, requieren un control de mantenimiento periódico de sus instalaciones en cuanto a posibles mermas de espesor en tuberías, recipientes, etc. Hoy día, se dispone de equipos prácticamente de bolsillo, cuyo manejo es elemental y que permiten medir espesores desde 2 hasta 300mm.

Para evitar problemas de pérdida de la indicación por efecto de mal acoplamiento, o excesiva atenuación del material, estos equipos disponen de un amplificador de ganancia automática que controla el

nivel de señal. Precisamente, el desarrollo de éste tipo de amplificadores ha permitido impulsar la utilización de éstos equipos. Las señales que no alcanzan un determinado nivel, no se amplifican y el equipo no proporciona indicación. De igual modo, toda señal que rebasa el umbral mínimo, se amplifica hasta alcanzar un valor prefijado y constante, por lo que los errores posibles por altura de señal quedan muy reducidos. Los palpadores utilizados son de doble cristal, uno emisor y el otro receptor, separados.

**b) Intensidad acústica y tiempo de recorrido.**

Los equipos de pulso-eco de medida de la intensidad acústica y el tiempo de recorrido, emiten impulsos acústicos cortos, a intervalos constantes, de manera que se obtiene una respuesta periódica en función del tiempo de recorrido del impulso acústico desde el oscilador emisor al cristal piezoeléctrico receptor, al igual que en el caso descrito anteriormente. El impulso acústico recibido, procedente de su reflexión en una discontinuidad o en una superficie límite de la pieza, se transforma en una señal o impulso eléctrico, que se visualiza según una indicación en la pantalla cuya altura es proporcional a la presión acústica del eco. En la figura 45 se reproducen los oscilogramas que se obtienen para los diversos ejemplos mostrados de detección de discontinuidades. Se comprueba como, además de detectar pequeñas discontinuidades, se puede determinar su posición, lo cual representa un avance decisivo para la mayoría de las aplicaciones.



**FIGURA 45.** Sistema pulso-eco.

Se presentan los oscilogramas correspondientes a las posiciones presentadas de los palpadores, supongamos que, en primer lugar, el equipo se encuentra calibrado para la distancia presentada en las figura 45 a y 45 b. Partiendo de ésta suposición, veremos que si las discontinuidades presentes en la pieza de ensayo son pequeñas comparadas con la sección del haz ultrasónico, se obtiene, simultáneamente con la indicación de su eco, la del eco de fondo de la pieza (figura 45 a), a una distancia del origen en la base de tiempo, proporcional a la distancia real si la base de tiempo es lineal, tal como ocurre en la mayoría de los equipos, Si la discontinuidad presenta una superficie capaz de interceptar todo el haz, no se obtendrá indicación de eco de fondo ni de otras discontinuidades más alejadas, que se encuentren ocultas detrás de ésta (figura 45 b).

La desaparición de la indicación del eco de fondo proporciona, una información adicional acerca del tamaño del reflector. Si la pieza tiene sus superficies paralelas, pueden aparecer en la pantalla varias indicaciones de los sucesivos ecos de fondo, siempre que el rango de espesor que puede abarcar la pantalla sea lo suficientemente grande como para que cubra la distancia correspondiente a varias veces el espesor. En éste caso se obtiene un oscilograma de ecos múltiples, como el de la figura 45 c. La sucesión de indicaciones de los ecos de fondo, se produce como consecuencia de las reflexiones sucesivas del impulso acústico en las superficies paralelas de la pieza, perdiendo, en cada recorrido de ida y vuelta, una parte de su energía por atenuación y, otra parte por reflexión de los ecos de indicación, por lo que cada indicación de los sucesivos ecos de fondo pierde altura en relación con la que le precede. La pendiente de la curva que forman los picos de las indicaciones de los sucesivos ecos de fondo, permite la medida del coeficiente de atenuación del material. Sí y solamente si, la base de tiempo es lineal, las indicaciones de los sucesivos ecos de fondo aparecen a distancias iguales.

Fue indicado anteriormente que los equipos de medida. De la intensidad acústica y del tiempo de recorrido están especialmente diseñados para los métodos de pulso - eco, lo que no les impide operar según los métodos de transparencia o sombra. Pero además, se pueden utilizar en ensayos en los que sólo interese una de las dos magnitudes mencionadas. Su versatilidad es, pues, una de sus principales ventajas.

#### **3.1.1.4. Circuitos electrónicos.**

##### **3.1.1.4.1. Suministrador de energía.**

Es el componente que suministra la energía eléctrica a los circuitos. Existen dos tipos de fuentes de energía:

- a) Línea comercial (corriente alterna).
- b) Baterías (corriente directa).

##### **3.1.1.4.2. Circuito de reloj o contador de tiempo.**

Este circuito es la fuente de todas las señales de sincronización enviadas al circuito transmisor. Sus funciones son las siguientes:

a) Generar la señal de sincronización para la emisión de pulsos eléctricos de alta frecuencia, por parte del circuito transmisor también conocido como generador de alta frecuencia. La cadencia con que se envía el pulso eléctrico de excitación al transductor se denomina “frecuencia de repetición de pulsos” y se expresa en pulsos por segundo (p.p.s.). Es necesario que la frecuencia de repetición sea lo más alta posible, puesto que de esta forma se superpondrán más imágenes por unidad de tiempo; con lo que el oscilograma resultará con más brillo. Sin embargo, una frecuencia de repetición excesiva puede dar lugar a la aparición de indicaciones de los llamados “ecos fantasmas”. Estas indicaciones de ecos perturbadores se identifican sin mucha dificultad, ya que en general no se mantienen fijas en sus posiciones, sino que oscilan ligeramente de derecha a izquierda, debido a las pequeñas variaciones inevitables de la frecuencia de repetición de pulsos. Otra forma eficaz de identificar los ecos fantasmas es disminuyendo la frecuencia de los pulsos por medio del control correspondiente. En los equipos modernos, no es común la aparición de ecos fantasmas, puesto que éstos ajustan automáticamente la frecuencia de repetición de pulsos en función del espesor seleccionado; de manera que, a menores velocidades de barrido (mayores espesores de material), la frecuencia de repetición de pulsos disminuye. Solo en productos de gran espesor con un coeficiente de atenuación excepcionalmente reducido puede ocurrir que aparezcan indicaciones correspondientes a “ecos fantasmas”.

b) Controlar la luminosidad del “pincel electrónico”, de manera que se extinga cuando éste haga el recorrido de derecha a izquierda de la pantalla, durante el tiempo pasivo, para evitar la superposición de imágenes que harían difícil la interpretación. Este circuito envía simultáneamente una señal de sincronización a los circuitos generadores de barrido y al transmisor.

#### **3.1.1.4.2.1. Intervalo de reloj.**

El intervalo de reloj (**clock interval “C.I.”**) es el tiempo que transcurre de una pulsación a otra (**un ciclo completo**) y se puede expresar como el inverso del número de pulsos por segundo (**p.p.s.**):

$$C.I. = \frac{1}{p.p.s.}$$

Como quiera el nombre “reloj” implica que el tiempo de disparo se repite a un valor regular de frecuencia llamada “**RATA DE REPETICIÓN DE PULSO (R.R.P)**”, ésta es la frecuencia con la cual el circuito del reloj envía pulsos de disparo al circuito generador de barrido y el transmisor generador de pulsos. Es usualmente entre 50 y 10.000 pulsos por segundo.

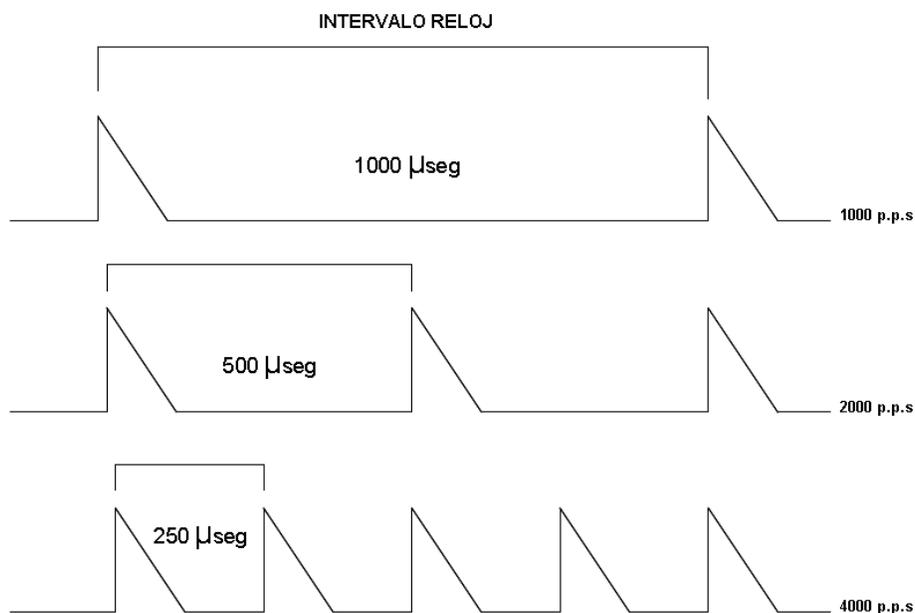
**Ejemplo:**

**R.R.P = 2000 μseg.**

**C.I=?**

$$\frac{1 \text{ seg}}{\text{R.R.P}} = \frac{1.000.000 \mu\text{seg}}{\text{R.R.P}}$$

$$\frac{1.000.000 \mu\text{seg}}{2000 \text{ p.p.s}} = 500 \mu\text{seg}$$

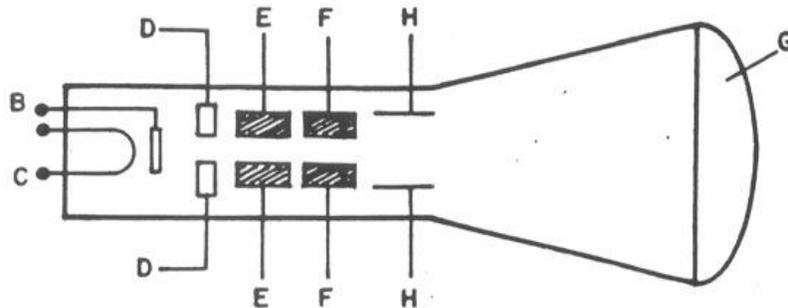


**FIGURA 46.** Rata de repetición de pulso.

### 3.1.1.4.2.2. Tubo de rayos catódicos (Tubo de Braun).

Es un tubo especial termoiónico que se emplea frecuentemente como indicador y medidor eléctrico, así como para producir imágenes en los receptores de televisión. Consta de una ampolla de vidrio en cuyo interior se aloja un cátodo discoidal (**B**) y detrás del cátodo se halla emplazado un

filamento (C). Al calentarse el cátodo emite electrones que son acelerados hacia una rejilla positiva (D), consistente en un disco con un orificio.



**FIGURA 47.** Tubo de rayos catódicos.

Los electrones emitidos, después de atravesar el orificio, reciben una nueva aceleración hacia el ánodo tubular (E), cargado positivamente. En este punto se concentran formando un estrecho haz que se dirige al ánodo (F), el cual posee mayor carga positiva y menor diámetro que (E). En (F) el diámetro del haz de electrones experimenta una última focalización y un aumento en su velocidad. El haz atraviesa el orificio del ánodo (F) e incide sobre la superficie del tubo (G), recubierta de un material fluorescente que convierte en energía luminosa la energía desarrollada por el haz de electrones, la intensidad de este punto de luz puede regularse cambiando la tensión positiva de la rejilla (D), que controla el paso de los electrones hacia los ánodos (E) y (F).

#### **3.1.1.4.2.2.1. Placas deflectoras.**

Existen dos juegos de placas de este tipo, perpendiculares entre sí, para que el haz pueda ser desviado en ambas direcciones. También se les conoce como “placas deflexionadoras”. Las placas H y H, con su forma especial, sirven para situar el haz en la pantalla. Aplicando una tensión entre estas placas, el haz se verá desviado hacia la placa positiva y repelido por la negativa. En un tubo típico de rayos catódicos existen dos juegos de placas de este tipo, perpendiculares entre sí para que el haz pueda ser desviado horizontal o perpendicularmente en la pantalla.

#### **3.1.1.5. Generador de barrido.**

Este circuito controla la polaridad de las placas deflectoras horizontales para que el haz de electrones forme la línea base en la pantalla del tubo de rayos catódicos. El cambio de polaridad puede ser modificado por medio del *control de distancia (rango)*, para hacerlo más rápido o más lento con el fin de poder ajustar la lectura en la pantalla a un valor de espesor predeterminado. El ajustar la velocidad de barrido nos permite ver en la pantalla la señal producida por el reflejo del ultrasonido en la pared posterior

del material, de manera que el tiempo que tarda en recorrer la anchura total de la pantalla (tiempo activo), sea idéntico al que tarda el pulso ultrasónico en recorrer un espesor dado de material. Ello constituye la calibración de distancias, a medida que se aumenta la distancia disminuye la velocidad del barrido, por lo que a menor distancia la velocidad de barrido es mayor. Para calcular el número adecuado de pulsos por segundo, se tiene que saber en que tiempo recorre el sonido toda la distancia del material a ensayar.

**Ejemplo:**

La velocidad del sonido en el acero es de  $2.3 \times 10^5$  pulsos por segundos. ¿En qué tiempo recorre el sonido una pulgada?

230 000 pulgadas -----1 segundo

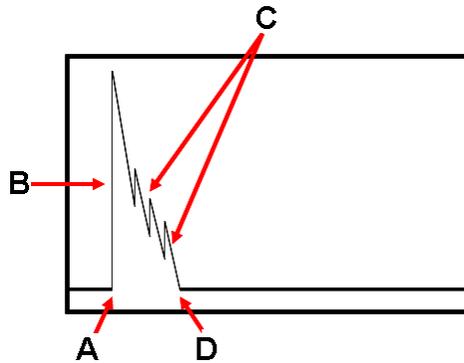
Por lo tanto:

$$t = \frac{1 \text{ pulg} \cdot 1 \text{ seg}}{230000 \text{ pulg adas}} = 4.34 \times 10^{-6} \text{ segundos}$$

Este resultado es el tiempo que tarda el sonido en viajar una pulgada; no obstante, como regla general se tiene que el intervalo de reloj debe ser 5 a 7 veces mayor que el tiempo que tarda el sonido en el material.

**3.1.1.6. Circuito transmisor generador de pulsos.**

El circuito transmisor generador de pulsos también conocido como “**generador de alta frecuencia**”, es la fuente de pulsos eléctricos cortos de alta energía que son generados al recibir la señal de sincronización producida por el circuito de reloj. Los pulsos eléctricos de alta frecuencia son emitidos con un cierto potencial (entre 100 y 1000 voltios). El pulso inicial “**B**” (primera indicación en la línea de tiempo base), se produce al enviar del circuito transmisor al circuito receptor una fracción muy reducida de la energía del pulso eléctrico transmitido al transductor, de manera que el punto de arranque de esa señal es el origen de tiempo de la pantalla. El punto de arranque del pulso inicial marca el tiempo cero eléctrico “**A**”; es decir, el momento en que el pulso eléctrico llega al cristal emisor se produce un efecto de sonoridad llamado Ringing del cristal “**C**”. Desde ese momento hasta que el pulso ultrasónico comienza a penetrar en el material, transcurre un cierto tiempo cuya magnitud depende primordialmente del trayecto previo entre el cristal y la superficie del material; por ello, el cero eléctrico “**A**” no coincide con el cero acústico “**D**” y se produce el *Main Bang*.



**FIGURA 48.** Componentes del Main Bang en el TRC.

### 3.1.1.7. Circuito receptor.

Las ondas acústicas que llegan al cristal receptor después de recorrer el material, generan pulsos eléctricos de voltajes que varían desde una milésima de voltio hasta 1 voltio como máximo. El pulso eléctrico generado es enviado a un subcircuito *detector* cuya función es rectificar la señal recibida, eliminando la mayor parte de la porción negativa y quedando solo una pequeña cantidad de ésta.

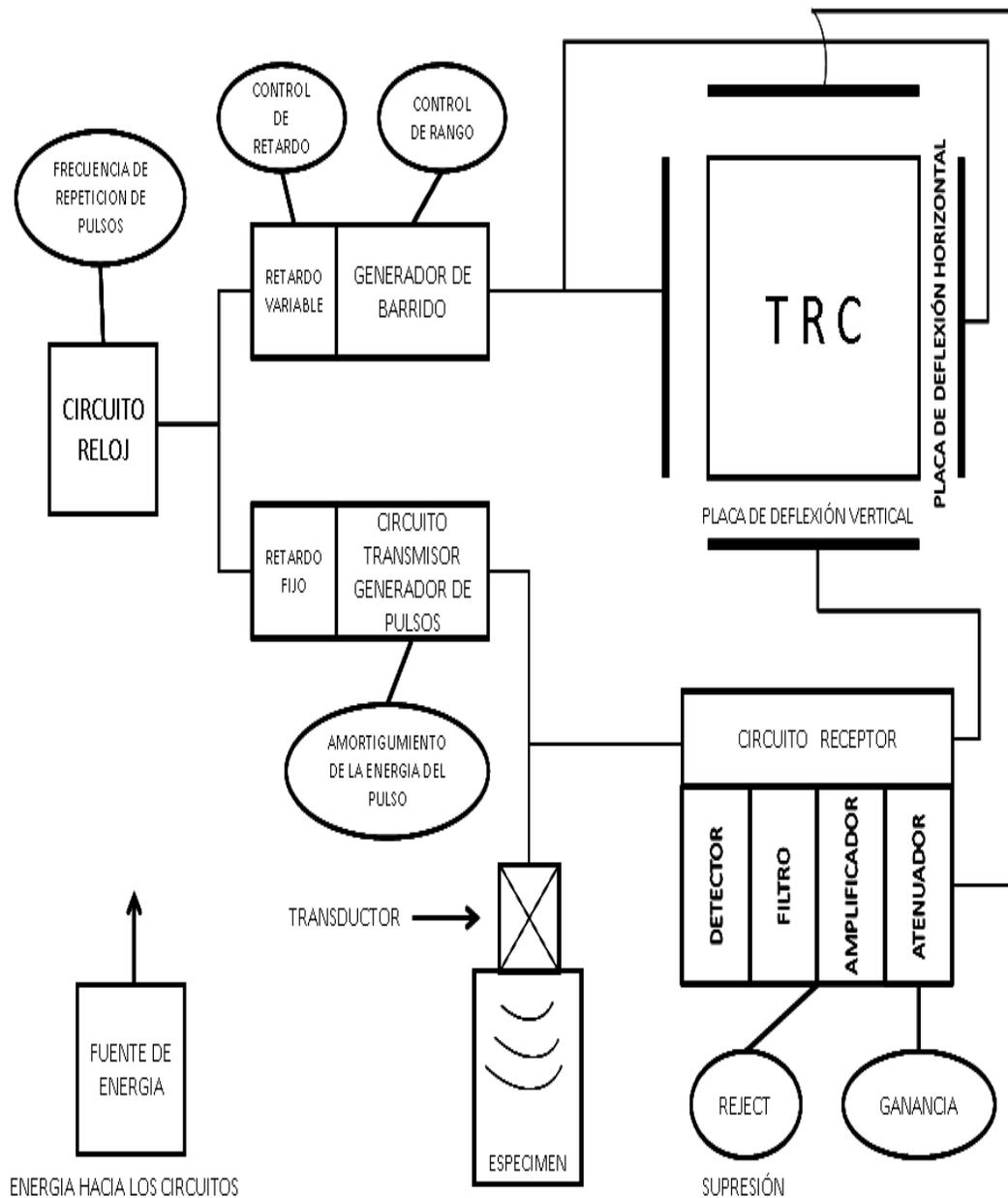
Posteriormente es purificada por el subcircuito *de filtro*, que corrige la señal al eliminar la mayor parte de las señales secundarias que están por debajo de una frecuencia preestablecida.

A continuación el pulso eléctrico es enviado al subcircuito *amplificador*, que incrementa la señal para obtener una indicación en la pantalla o en el graficador con una amplitud preestablecida. El circuito amplificador tiene la propiedad de incrementar la señal en una relación de 1 a 10 000, esto es debido que generalmente el tubo de rayos catódicos o el graficador requieren de una diferencia de potencial de hasta 100 voltios para su modulación completa.

Es recomendable que el amplificador sea de banda ancha, con el fin de poder amplificar con un mínimo de distorsión los pulsos eléctricos cortos, cuyo espectro de frecuencias es muy amplio. Al amplificar la señal de la discontinuidad, también se amplifican las señales parásitas conocidas como **ruido de fondo** (grama), el cual se incrementa proporcionalmente con la raíz cuadrada del ancho de la banda del espectro ultrasónico; por lo que una banda más estrecha permitirá mayores niveles de amplificación, conservando a la vez una buena relación (3 a 1) **señal – ruido**.

Por último, el impulso pasa al subcircuito *atenuador* de control de rechazo que modifica la amplitud de la señal, regulando la potencia con la que ésta ha sido aumentada por el amplificador.

Este subcircuito modifica tanto la amplitud de las indicaciones como la del ruido de fondo, por lo que su operación debe efectuarse con cuidado. La figura 49 representa un diagrama esquemático de los circuitos y subcircuito de un equipo de ultrasonido.

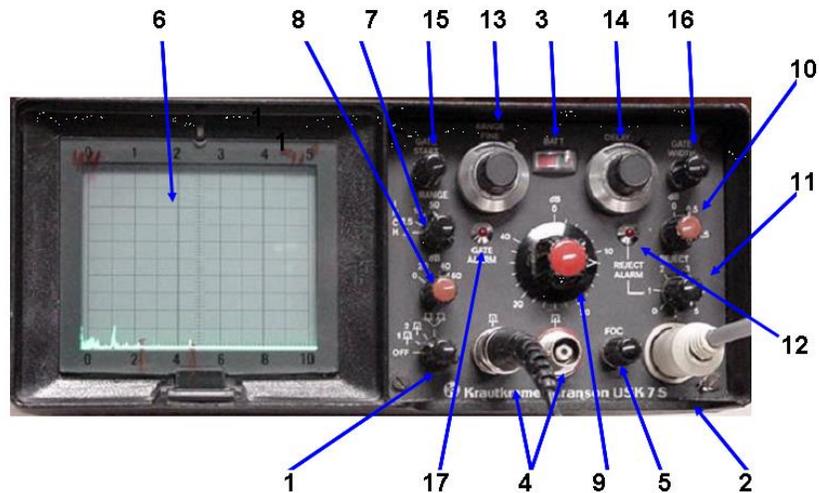


**FIGURA 49.** Diagrama funcional básico del instrumento ultrasónico.

### 3.1.1.8. Función de los controles.

#### 3.1.1.8. 1. Equipo USK7S de la Krautkramer.

Es un equipo de control analógico detector de fallas (pulso-eco y transmisión) con presentación A-scan y pantalla TRC.



**FIGURA 50.** Controles del equipo ultrasónico marca Krautkramer, modelo USK7S.

- |  |  |
|--|--|
| 1. Control de encendido.                 | 2. Conexión de la fuente de energía.   |
| 3. Indicador del nivel de batería.       | 4. Conectores de cable coaxial.        |
| 5. Control del foco de la pantalla.      | 6. Pantalla TRC.                       |
| 7. Control del rango grueso.             | 8. Control de ganancia gruesa.         |
| 9. Control de ganancia media.            | 10. Control de ganancia fina.          |
| 11. Reject.                              | 12. Indicador de alarma del reject.    |
| 13. Control de rango fino.               | 14. Control del delay o retardo.       |
| 15. Control de inicio de la compuerta.   | 16. Control del ancho de la compuerta. |
| 17. Indicador de alarma de la compuerta. |  |

**1. Control de encendido:** Permite el encendido y apagado del equipo. El instrumento es configurado para trabajar con un transductor sencillo en inspecciones del tipo pulso-eco. Cuando se coloca en la posición dual, el instrumento es configurado para trabajar en ensayos con transductores de doble cristal, las cuales pueden ser: medición de la presión acústica, emisor-receptor y pulso-eco con transductor de doble elemento.

**2. Conexión de la fuente de energía:** Entrada del terminal del cargador correspondiente.

**3. Indicador del nivel de batería:** Indica la condición de las baterías. Rojo: descargada. Verde: cargada.

**4. Conectores de cable coaxial:** Entradas de los terminales del cable coaxial.

**5. Control del foco de la pantalla:** El control de foco ajusta la forma del trazo en la pantalla para proporcionar una línea sin deformación. El control de astigmatismo ajusta la imagen del trazo para presentar una imagen simétrica.

**6. Pantalla TRC:** Muestra el oscilograma generado por el instrumento. Normalmente tiene superpuesta una retícula, en la cual el eje horizontal representa el tiempo de recorrido del haz ultrasónico en función de la distancia; y el eje vertical la cantidad de energía reflejada por la discontinuidad en función de la amplitud.

**7 y 13. Control del rango grueso/fino:** La función que cumple este control, es la de seleccionar el rango mínimo de calibración de escala horizontal en pantalla. En otras palabras, expandir o contraer la línea horizontal de la pantalla.

**8, 9 y 10. Control de ganancia gruesa/media/fina:** Este control ajusta la sensibilidad del instrumento. Incrementando la ganancia aumenta la amplitud vertical de las señales en la pantalla, por lo cual las pequeñas discontinuidades producen indicaciones fácilmente observables. Este control está dividido en ajuste grueso, medio y fino, que en conjunto proporcionan una ganancia calibrada para ajustar el receptor del instrumento desde 0 hasta 100 dB en incrementos de 0.5, 2 y 20 dB. Cuando una inspección requiere encontrar comparativamente discontinuidades en materiales de buenas propiedades acústicas, se utiliza menor amplificación que cuando se están buscando en materiales de propiedades acústicas bajas.

**11. Reject:** Permite mejorar la amplitud de las indicaciones presentadas en pantalla disminuyendo las señales parásitas mediante arreglos electrónicos.

**12. Indicador de alarma del reject:** Es un indicador LED, el cual señala si esta en funcionamiento el selector “reject”.

**14. Control del delay o retardo:** Determina el comienzo del trazo en la pantalla con respecto a las veces que el pulso es presentado. Este control hace posible desplazar las señales en la pantalla en forma horizontal, hacia la derecha o hacia la izquierda. En todos los casos se mantiene la relación de rango de barrido. En el método de inmersión, el retraso de barrido es usado para desplazar hacia la izquierda el pulso inicial hasta eliminarlo de la pantalla, llevando a cero la primera reflexión.

**15. Control de inicio de la compuerta:** Determina el punto inicial de la compuerta en la TRC.

**16. Control del ancho de la compuerta:** Determina la distancia de la compuerta en la TRC.

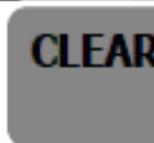
**17. Indicador de alarma de la compuerta:** Es un indicador LED, el cual es activado cuando una indicación coincide con la compuerta.

**3.1.1.8.2. Equipo para medición de espesores por ultrasonido DMS de la marca Krautkramer.**

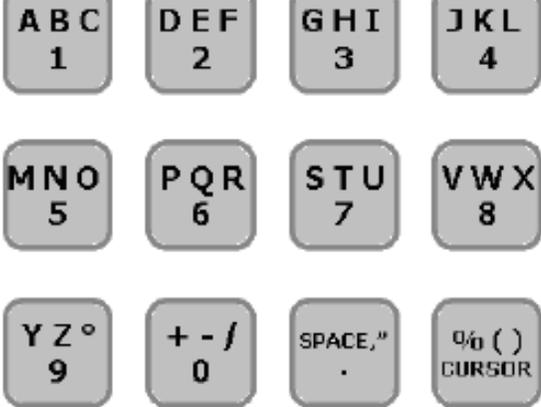
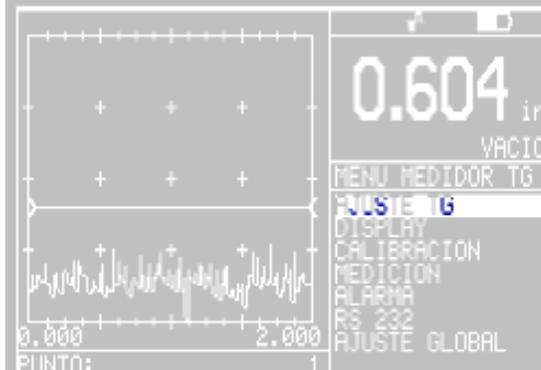
El DMS es un equipo para medición de espesores por ultrasonido que registra las lecturas obtenidas de forma directa, la figura 51 describe la vista frontal del equipo DMS.



**FIGURA 51.** Vista frontal de un equipo DMS.

	Tecla de ENCENDIDO y APAGADO
	Cambia el cursor entre el último parámetro del Menú TG activo y la última localidad activa que se encuentre en el área del Almacenador de Datos (DR).
	Cambia entre el modo TG (Medidor de espesores) y el modo DR (Registro de Datos).
	Proporciona un acercamiento de la señal (es). En el modo doble cristal proporciona dos niveles de amplificación de imagen.
	Activa y Desactiva la función de congelamiento.
	Transmite las lecturas y/o imágenes a la memoria interna del equipo, o a dispositivos externos vía puerto RS-232
	Activa los parámetros del Menú, así como también nos permite la introducción de nuevos parámetros.
	Restablece el parámetro anterior, sale del campo de valores y regresa al de parámetros.
	Entrada alfanumérica: si la tecla del cursor es activada, se puede borrar los caracteres de uno en uno. Si no es activada borra el campo completamente colocándose el cursor a la izquierda.
	Cuando es activada el cursor cambiará de posición en forma ascendente, si se trabaja con archivos tipo matriz el cursor cambiará de renglón.
	Cuando es activada el cursor cambiará de posición en forma descendente, si se trabaja con archivos tipo matriz el cursor cambiará de renglón.

Teclas de Control del equipo DMS.

	<p>Cuando esta tecla es activada, el cursor se moverá a la izquierda. Cuando se este trabajando con archivos tipo matriz el cursor cambiará de columna.</p>
	<p>Cuando esta tecla es activada, el cursor se moverá a la derecha. Cuando se este trabajando con archivos tipo matriz el cursor cambiará de columna</p>
	<p>Teclas Alfamuméricas: Al oprimir por primera vez la tecla se introducen los números (ejemplo 1, 2,3, etc.), la siguiente vez que se oprime la tecla se introducen los caracteres alfanuméricos en el orden que muestra la tecla (ejemplo A, B, C, etc.).</p>
	<p>Pantalla de un equipo DMS en Menú Principal.</p>

### Teclas de control del equipo DMS.

En la actualidad existen diversos modelos de equipos digitales de avanzada tecnología, como por ejemplo; *USN 60*, *USM 35*, *DMS*, *DMS2* de *Krautkramer* con pantallas *LED* ó *LCD* (en presentación A-scan, B-scan y C-scan) con la finalidad de facilitar la detección de fallas en materiales y su interpretación.



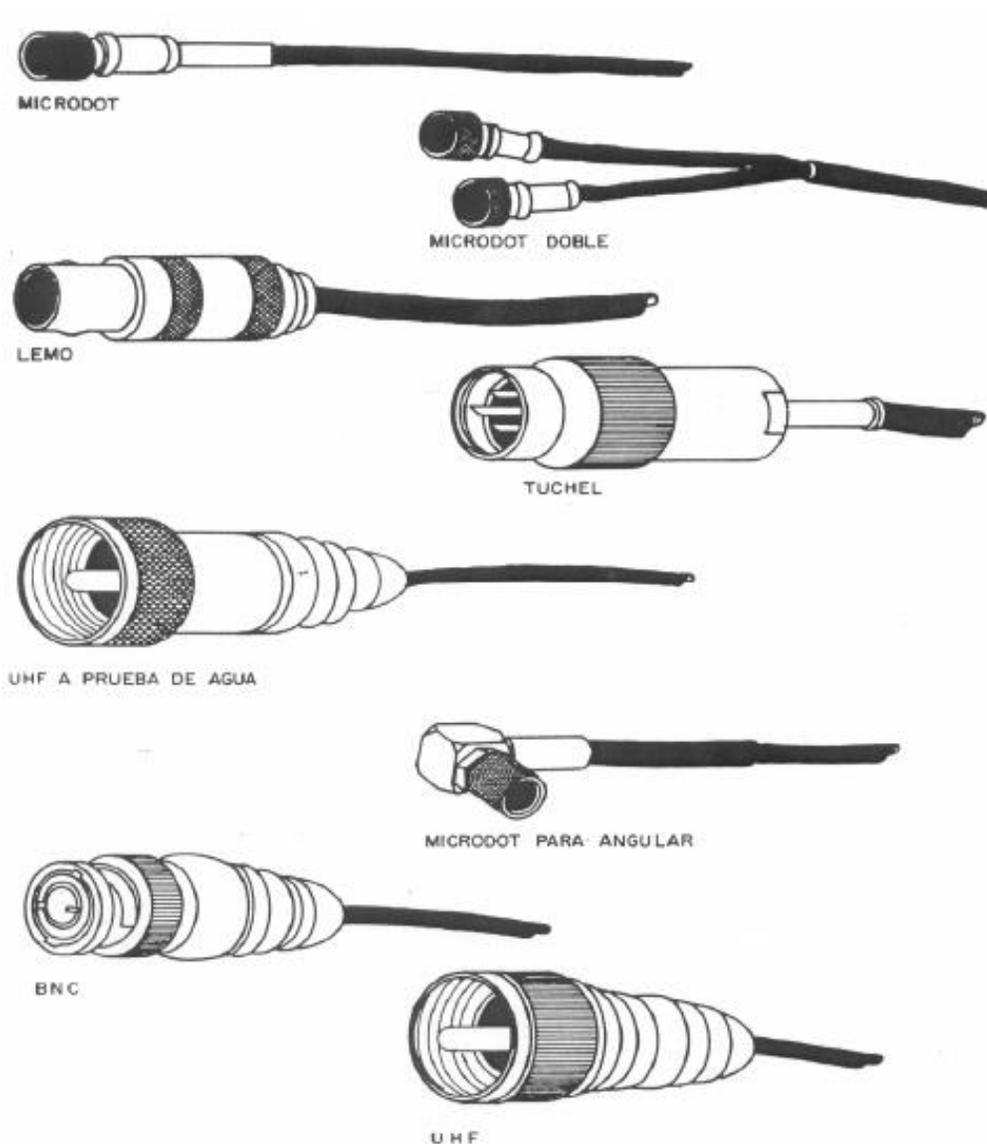
FIGURA 52. Equipos digitales.

### 3.2. Cable coaxial y terminales.

Uno de los componentes del sistema de ultrasonido es el cable coaxial, que en sus extremos posee terminales, mediante los que une el instrumento y el transductor.

Los tipos de terminales más comunes son:

- Microdot, para transductores muy pequeños (con cuerda).
- BNC, de medio giro.
- UHF, para muy alta frecuencia (con cuerda), usado en inmersión.
- LEMO, de media presión como el utilizado en el transductor de rueda.
- Tuchel.



**FIGURA 53.** Diferentes tipos de terminales.

### 3.3. Presentación de Datos.

Existen tres tipos de presentación visual de datos que operan en base a la amplitud y/o el tiempo que tarda un pulso ultrasónico en ser reflejado, mostrando la solidez o calidad de los materiales. Estos tipos de presentación son conocidos como:

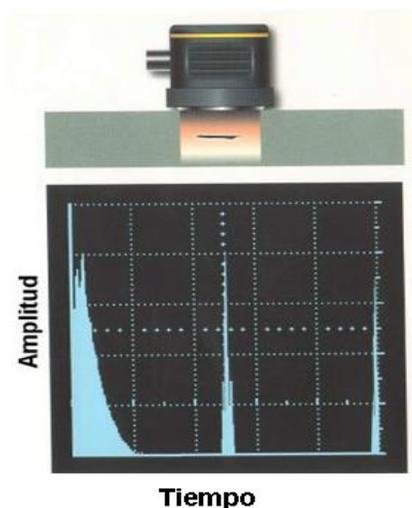
- Presentación A-scan.
- Presentación B-scan.
- Presentación C-scan.

El tipo de presentación más común, que utiliza una pantalla de tubo de rayo catódico "CRT" (cathode ray tube), se conoce como A-scan, Los equipos ultrasónicos utilizados en aplicaciones médicas utilizan la presentación B-scan, y gran parte, aunque no todos, los equipos que operan bajo la técnica de inmersión utilizan la presentación C-scan.

#### 3.3.1. Presentación A-scan.

Es el más extendido y es el de representación en un tubo de rayos catódicos (TRC) en el que las indicaciones aparecen como deflexiones verticales de la base de tiempo, es decir, en la pantalla se representa el tiempo en la escala horizontal y la amplitud en la escala vertical. La representación tipo A, se discrimina de izquierda a derecha. La altura de los ecos pueden ser comparadas con la altura de un eco proveniente de un reflector de referencia conocido, a fin de tener una referencia del tamaño de la indicación.

El método de registro más sencillo para este tipo de pantalla es el de la fotografía directa del oscilograma. Sin embargo, este método es lento por lo que, en ocasiones, se acoplan al equipo sistemas de registro sobre papel que el propio operador puede manejar de manera simple, obteniendo la representación del oscilograma en tiempo real.



**FIGURA 54.** Presentación A-scan.

### 3.3.2. Presentación B-scan.

La presentación B-scan, usa una pantalla de osciloscopio típico que muestra una vista de una sección transversal del material a ser ensayado. La imagen es retenida sobre el TRC el tiempo necesario para evaluar la pieza y para fotografiar la pantalla, con el objeto de obtener un registro permanente.



FIGURA 55. Presentación B-scan.

### 3.3.3. Presentación C-scan.

La presentación C-scan, representa una vista en planta, similar a una placa radiográfica. Además, muestra la forma y localización de la discontinuidad, pero no su profundidad.

Los sistemas de alta velocidad de barrido, generalmente utilizan presentación C-scan, conjuntamente con graficadores, algunos de ellos con papel tratado químicamente.

El movimiento del papel está sincronizado con el movimiento del transductor a través de la superficie de ensayo.

La ventaja de la presentación C-scan, es su velocidad y su capacidad de producir registros permanentes. Sin embargo, la presentación solamente da longitud y ancho, pero no la profundidad de la falla.

Este tipo de presentación, junto con el B-scan, prácticamente están reservados a los ensayos automáticos por inmersión.

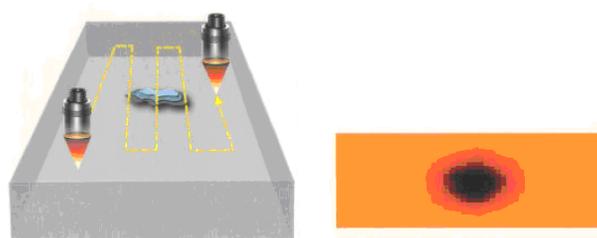


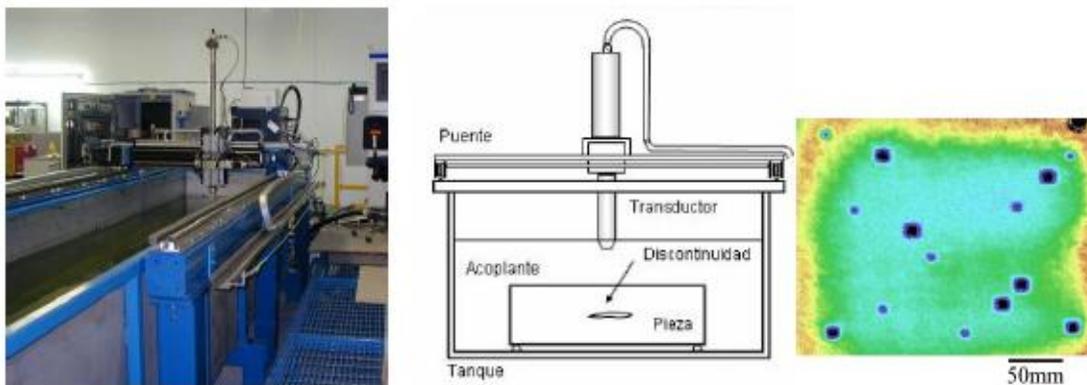
FIGURA 56. Presentación C – scan.

### 3.4. Otros equipos y sistemas.

La técnica de inspección ultrasónica ha encontrado aplicación en casos especiales de la industria. Los fabricantes han desarrollado todo tipo de equipos y sistemas que permiten monitorear componentes en servicio, con la mayor rapidez y facilidad de interpretación. Desde la industria automotriz, hasta la determinación de pared remanente en tuberías de la industria energética, los sistemas representan un ahorro en tiempos de inspección y manejo de grandes cantidades de información, además de la posibilidad de poder automatizarlos en una línea de producción.

Entre estos encontramos a los sistemas de inmersión, una aplicación ultrasónica automatizada en la que se sumergen las piezas a inspeccionar en un contenedor lleno de acoplante. Estos sistemas representan un ahorro en medios acoplantes y en transductores, ya que se puede manipular fácilmente el ángulo de incidencia solo inclinando el transductor.

La presentación que se obtiene en este caso es una presentación C-scan, que se considera una toma de la vista superior de la pieza inspeccionada. Conforme el transductor recorre la zona de barrido, la imagen se actualiza mostrando cualquier discontinuidad interna.



**FIGURA 57.** Sistema de inmersión con presentación C-scan.

### 3.5. Acoplantes.

Entre los factores que influyen en la transmisión del ultrasonido, a través de la superficie de exploración, se pueden mencionar los siguientes:

- Medio de acoplamiento.
- Condición de la superficie y acabado superficial.
- Curvatura superficial.
- Frecuencia y diámetro del cristal. **(Descrito en el capítulo 2).**

### 3.5.1. Efecto del medio de acoplamiento.

El propósito de la utilización de acoplantes en ultrasonido, es el de proveer una trayectoria con baja resistencia a la transmisión del sonido, entre el palpador y la pieza de ensayo. El aire es un mal transmisor de la energía ultrasónica (altas frecuencias). Adicionalmente, su impedancia acústica es muy diferente a la de los materiales sólidos, por lo que, para frecuencias del orden de 200 kHz, estimando que el espesor de la película de aire fuera aproximadamente 0,00001 mm, se obtendría una transmisión en el aluminio del orden del 80:7 de la presión acústica incidente. Para este orden de frecuencias, la transmisión en el acero sería aún del orden del 30:7 de la presión acústica incidente. Pero para las frecuencias normales de ensayo (2 a 10 MHz), y espesores de película de aire del orden de 0,0001 mm, la transmisión, en ambos casos, sería nula. Tan sólo una pequeña capa de un material acústicamente transmisor, es suficiente para proporcionar una buena transmisión de la onda.



**FIGURA 58.** Acoplantes.

#### 3.5.1.1. Tipos de acoplantes.

Algunos materiales acoplantes, son agua, multicultulosa, algunos tipos de aceites, glicerina, grasas en base a petróleo, grasas en base a silicona, pulpa de papel, mercurio, plastilina y muchas otras pastas. Las gomas suaves pueden transmitir el sonido y son denominadas: acoplantes secos. Otros métodos de acople, tales como la unión por presión de dos materiales sólidos, dan excelentes resultados; si aplicamos presión hasta 1.000 Psi (libras por pulgada cuadrada), aproximadamente, podemos lograr una excelente transmisión de la onda.

#### 3.5.1.2. Selección del acoplante.

Los acoplantes son seleccionados de acuerdo con varios factores que son:

- Costo.
- Disponibilidad.
- Viscosidad.
- Adherencia a la superficie.
- Reacciones químicas posibles.
- Requerimientos de limpieza después del ensayo.

### 3.5.1.2.1. Acoplantes para contacto directo.

Adicionalmente, para ensayos por el método de contacto directo, la elección del agente acoplante depende también, de otras características de la pieza de ensayo, que son:

- Condición superficial.
- Temperatura superficial.
- Inclinación de la superficie.

Basándonos en los factores de selección expuestos, podemos clasificar, según sus características básicas, a los materiales acoplantes mencionados previamente.

El agua es el de menor precio y mayor disponibilidad de todos los acoplantes. Sin embargo, tiene una baja viscosidad, por lo que no es recomendable su uso en condiciones donde pueda escurrirse fácilmente, o cercano a conexiones eléctricas. Tiende a reaccionar desfavorablemente con muchos materiales metálicos.

Sin embargo, combinada con algunos otros productos, puede proporcionar buenos resultados.

Los medios de acoplamiento acústicamente conductores, generalmente empleados son: las grasas y los aceites minerales de diversos grados de viscosidad. Cuanto mayor es la rugosidad superficial, mayor debe ser la viscosidad del aceite. Aun así, debe prestarse cuidado a la aparición de señales parásitas, debidas a la generación de ondas superficiales. Su viscosidad varía drásticamente con la temperatura, y algunos son inflamables. La atenuación producida por la grasas, especialmente las fabricadas en base a silicona, es, frecuentemente, muy alta, por lo que pierden efectividad como acoplantes.

La glicerina es acústicamente muy conductora, pero presenta el inconveniente de no mojar bien la superficie de las piezas. Pese a ello, se aplica con mucha frecuencia, especialmente en superficies de acabado fino. Es el acoplante de más fácil remoción, pero su viscosidad varía rápidamente con la temperatura. La pulpa de papel y las pastas, en general, presentan propiedades deseables.

Estas pueden ser mezcladas con casi todo el resto de los acoplantes y mantendrán una textura seca, son fáciles de remover, pero tienden a endurecer muy rápidamente.

El mercurio y las amalgamas son los mejores medios de transmisión acústica para su aplicación en piezas metálicas; si bien, son caros, peligrosos y de aplicación engorrosa, por lo que raramente se emplean.

Como la adherencia no es buena en superficies rugosas; al explorar paredes verticales y bóvedas, se recurre al empleo de una mezcla gelatinosa de grasa y petróleo, o bien, de una pasta de metilcelulosa y agua con la adición de glicerina, para evitar que se seque, y de fosfato trisódico, para reducir la acción corrosiva.

La plastilina impregnada en aceite es el acoplante con mejores características de adherencia, presentando además la ventaja de que, en superficies rugosas, elimina en gran parte las señales parásitas, para ensayos en caliente, se pueden emplear aceites de alto punto de ebullición, superior a 300 °C, o

silicona, si bien ésta es cara. También, se puede realizar la exploración en caliente, acoplando al palpador, un adaptador de material plástico resistente a altas temperaturas y emplear agentes de contacto tales como grasas y siliconas especiales, con lo cual se puede realizar ensayos de muy corta duración hasta temperaturas de 550 °C, teniendo la precaución de enfriar el palpador y el adaptador entre dos aplicaciones consecutivas.

#### **3.5.1.2.2. Acoplantes para inmersión.**

En los ensayos de inmersión, el medio de acoplamiento es el propio líquido que rodea la pieza. Estos ensayos se realizan, bien sumergiendo la pieza, ensayo por inmersión en tanque; bien produciendo un flujo continuo sobre la misma, ensayo por inmersión local; de forma que entre el palpador y la pieza quede una película de líquido continua. Si se emplea agua como medio de transmisión, se añade a la misma un agente humectante, para evitar, además, la formación de burbujas, especialmente en la superficie del palpador, las cuales interferirían con la transmisión del haz ultrasónico, con frecuencia, en vez de agua se emplea kerosén que evita la oxidación de la pieza de ensayo.

#### **3.5.2. Efecto de la condición y del acabado superficial.**

Los efectos producidos por la condición de la superficie y el acabado superficial, pueden ser clasificados en dos grupos:

- Efecto de la condición superficial.
- Efecto del acabado superficial.

##### **3.5.2.1. Efecto de la condición superficial.**

Entre los efectos debidos a la condición de la superficie de exploración, hay que distinguir, en primer lugar, los ocasionados por la cascarilla de óxido, o por los recubrimientos (resultado de procesos tales como tratamientos térmicos, termomecánicos y protectivos), cuya falta de adherencia puede dar lugar a una menor sensibilidad de la transmisión de la presión acústica incidente, debido al efecto de la película de aire interpuesta entre la cascarilla o el recubrimiento y el material base. Por ello, conviene preparar la superficie de exploración, bien con lija, desbaste o chorro de arena (sand blasting), etc.

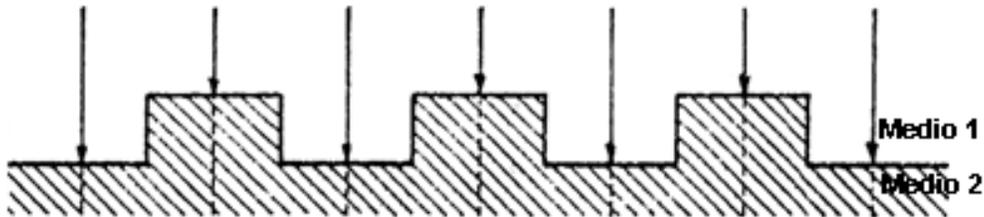
##### **3.5.2.2. Efecto del acabado superficial.**

En cuanto a los efectos propios de la rugosidad superficial, se pueden concretar los siguientes:

- Disminución de la transmisión de la presión acústica.
- Aumento de la anchura de la zona muerta.
- Cambios en la dirección del haz ultrasónico y generación de ondas parásitas superficiales.

*La disminución de la transmisión de la presión acústica*, depende de la rugosidad media, del índice de refracción y de la frecuencia.

Supongamos el caso de una superficie metálica rugosa, tal como se muestra en la figura 59 que incide un frente de ondas continuas, a través de un agente de contacto líquido. Estas se propagarán a distinta velocidad, según que encuentren un valle o una cresta de la superficie rugosa.



**FIGURA 59.** Efecto de la rugosidad superficial.

Supongamos que la diferencia de altura entre los valles y las crestas mostradas en la figura 59, es del orden de la mitad de la longitud de onda ( $\lambda/2$ ). En los valles, la velocidad de propagación será mas lenta que en las crestas, debido a la menor velocidad de propagación en el liquido que en el metal, por lo que las ondas, después de atravesar la capa rugosa, se encontrarán en distinta fase.

Cuando la diferencia entre el tiempo empleado por las ondas en recorrer un valle y una cresta sea igual a la mitad del período de oscilación, se producirá un fenómeno de interferencia en el plano de las ondas, una vez sobrepasada la superficie rugosa, dando una presión acústica resultante que puede llegar a anularse.

La rugosidad media para la cual se produce ésta interferencia, que anula la presión acústica de las ondas transmitidas, se denomina rugosidad crítica y viene dada por las expresiones

$$R_c = \frac{\lambda_2 V_1}{2(V_2 - V_1)} = \frac{\lambda_1 V_2}{2(V_2 - V_1)}$$

Donde;

$R_c$ = Rugosidad critica.

$\lambda_1$ = Longitud de onda en el líquido.

$\lambda_2$ = Longitud de onda en el metal.

$V_1$ = Velocidad de propagación del haz ultrasónico en el medio 1.

$V_2$ = Velocidad de propagación del haz ultrasónico en el medio 2.

Se obtienen efectos similares, cuando la rugosidad media de la superficie alcanza valores iguales a los distintos múltiplos de la rugosidad crítica. Lo anteriormente expuesto corresponde al caso ideal de propagación de ondas continuas, y de un perfil de la rugosidad de la superficie en forma de onda cuadrada (figura 59), lejos de los casos comúnmente encontrados en la práctica, en los que, si bien la presión acústica transmitida no llegará a anularse, experimentará, no obstante, una merma considerable, es decir, una disminución de su coeficiente de transmisión, específicamente en el caso de un mecanizado basto de la pieza.

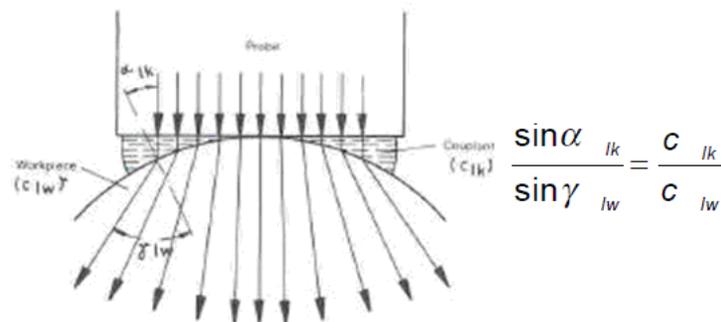
**El aumento de la anchura de la zona muerta** se presenta, fundamentalmente, en los ensayos por inmersión de muestras con superficies rugosas, y es debido, principalmente, a tres factores:

- Incidencia angular de los rayos periféricos del haz sobre la superficie de la pieza, que se traduce en una conversión de las ondas longitudinales en ondas transversales y superficiales.
- Diferencia en el tiempo de recorrido en el agua a través de la distancia cresta-valle de la superficie rugosa.
- Reflexión de los lóbulos laterales del haz ultrasónico en las rugosidades de la superficie de exploración.

La reflexión de los lóbulos laterales, como consecuencia de la rugosidad superficial produce, además, de dispersar las ondas, **cambios en la direccionalidad del haz y generación de ondas parásitas superficiales**, con la consiguiente aparición de interferencias que aumentan la anchura de la zona muerta, así, por ejemplo, cuando la distancia entre crestas y valles de una superficie rugosa es superior a la décima parte de la longitud de onda, se puede producir una dispersión lateral que incrementa el riesgo de reflexiones laterales, dando lugar a indicaciones que pueden simular la presencia de discontinuidades.

### 3.5.3. Efecto de la curvatura superficial.

La curvatura de la superficie de exploración, produce fenómenos de cambios en la divergencia del haz ultrasónico, bien aumentándola o disminuyéndola (focalización), y fenómenos de conversión de ondas que dan lugar a indicaciones falsas. Estos fenómenos dependen del sentido de la curvatura de la superficie de exploración y de que el ensayo se realice con incidencia normal o con incidencia angular.



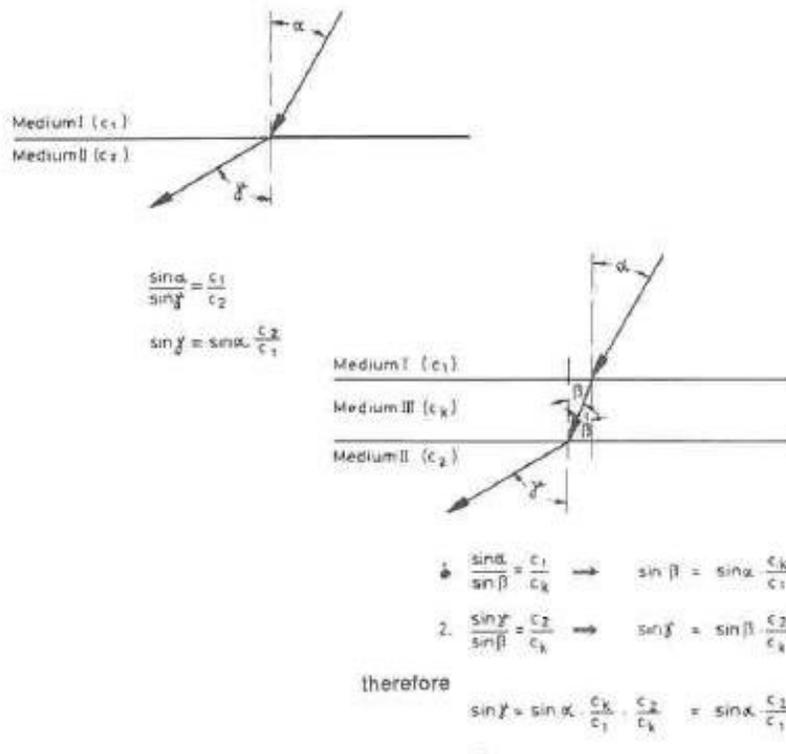
**FIGURA 60.** Divergencia adicional del haz causada por refracción entre el acoplante y la superficie de la pieza.

Además de esto, el área donde el palpador contacta a la pieza para la transferencia del sonido es menor, por lo que de esta forma, sólo se utiliza una parte de la superficie del cristal. Estos dos factores son la razón por la cual se reduce la sensibilidad del ensayo, comparado con el caso de una superficie plana.

Es frecuente el uso de bloques adaptadores para obtener un área de contacto total entre el palpador y la superficie de la pieza. También, las ya mencionadas capas de neopreno pueden ser de utilidad. Es preciso puntualizar que con esto sólo se consigue aumentar el área de contacto sin lograr evitar la divergencia.

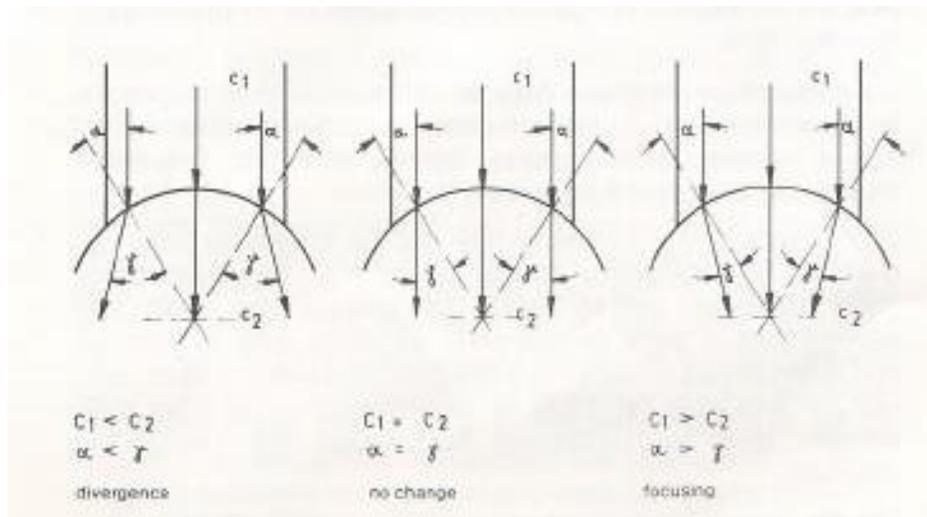
La magnitud de la divergencia depende de las velocidades del sonido en el acoplante y la pieza. Este hecho se puede utilizar para la elección del material del bloque adaptador más conveniente.

Como se ilustra en la figura 61, la doble refracción no tiene influencia en la propagación ultrasónica.



**FIGURA 61.** Refracción con y sin acoplante. El ángulo de refracción permanece constante; el haz ultrasónico es levemente desviado.

Por medio de la elección de materiales adecuados es posible, teóricamente, lograr una focalización (figura 62); debería considerarse que las pérdidas por reflexión debido a las grandes diferencias de las impedancias sónicas del adaptador y el acoplante generalmente son mayores que la ganancia obtenida por la focalización.



**FIGURA 62.** Influencia de las velocidades del sonido en el adaptador (C1) y la pieza (C2).

En el área de acoplamiento, por supuesto, se generan una serie de ecos; esto puede perturbar la interpretación de las indicaciones en la pantalla del TRC. Por esta razón, el bloque adaptador deberá ser lo más corto posible, de tal forma que los múltiples ecos estén muy juntos unos de otros y produzcan el menor ensanchamiento posible del eco de emisión (particularmente cuando se use un material con alta atenuación, causando sólo unos pocos ecos múltiples), o se deberá hacer tan largo de tal forma que los ecos múltiples no ocurran en el rango del ensayo sobre la pantalla del TRC. En este caso el tiempo de recorrido en el adaptador deberá ser mayor que el tiempo de recorrido en la pieza. Esto se puede calcular como sigue:

$$I_a > I_w \cdot \frac{V_a}{V_b}$$

Donde;

$I_a$ = Longitud del bloque adaptador.

$I_w$ = Longitud del camino sónico en la pieza.

$V_a$ = Velocidad del sonido en el bloque adaptador.

$V_b$ = Velocidad del sonido en la pieza.

### 3.5.3.1. Incidencia normal.

La curvatura de la superficie de exploración disminuye la sensibilidad, siendo, a éste respecto, las superficies convexas menos críticas que las cóncavas. En los ensayos por contacto, sobre una superficie convexa mediante un palpador plano, el área de contacto será muy reducida, lo que producirá un fuerte

aumento del ángulo de divergencia del haz en el interior de la pieza y, en consecuencia, una disminución de la sensibilidad.

En una superficie de exploración cóncava, si el palpador es plano, la sensibilidad disminuirá fuertemente, ya que el centro del palpador no hará, nunca, contacto con la superficie de la pieza. Con radios de curvatura relativamente pequeños, será preciso recurrir a dispositivos especiales, tales como el constituido por un adaptador en combinación con un mosaico de cristales, conjunto que actúa como una lente convergente compensando así, el efecto de la curvatura.

### **3.5.3.2. Incidencia angular.**

La incidencia angular de un haz ultrasónico sobre una superficie convexa, puede producir fenómenos de transformación de ondas que dan lugar a indicaciones falsas. Así, por ejemplo, en el ensayo circular por contacto sobre una superficie convexa, mediante un palpador angular de ondas transversales, adaptado totalmente a la curvatura, los rayos periféricos del haz, pueden formar ángulos de incidencia tales que propaguen, junto con las ondas transversales, ondas longitudinales y ondas superficiales, en cuyo caso se producirán indicaciones secundarias en la pantalla.

En superficies cóncavas, a fin de evitar estas ondas perturbadoras, es aconsejable, en el caso de superficies con radios de curvatura relativamente pequeños, no adaptar el palpador perfectamente a la misma, sino reducir la superficie de contacto, lo cual, si bien da lugar al aumento del ángulo de divergencia del haz ultrasónico, evita, no obstante, las perturbaciones causadas por los rayos periféricos. También se puede adoptar la solución de focalizar el haz por medio de un mosaico de cristales.

## **3.6. Calibración.**

### **3.6.1. Calibración básica del instrumento.**

Para la ejecución de la calibración de los sistemas ultrasónicos, se utilizan bloques o trozos metálicos con discontinuidades artificiales, que son usados para dos propósitos. Uno de los cuales se refiere a la determinación de las características de operación del instrumento y del palpador; la otra a establecer y reproducir los ecos de indicación de respuesta del instrumento durante los ensayos en piezas.

El ajuste básico del equipo se puede realizar con técnicas de haz recto y haz angular.

#### **3.6.1.1. Calibración con haz recto.**

Antes de realizar una inspección con un equipo ultrasónico, es necesario calibrar el equipo para obtener lecturas de distancia, exactas y confiables. Hay dos parámetros importantes que se ajustan al calibrar un equipo en distancia, **el primero es la velocidad de propagación de la onda ultrasónica**, a través del material de prueba; este ajuste es relevante debido a que se trata de una propiedad específica de cada material, lo que obliga al inspector a realizar una calibración por cada material distinto que se

inspección. **El segundo es el retardo del palpador, (o zero offset)** que es la distancia a partir de la cual se considera el cero en la lectura de longitud. Esta distancia la toma el equipo, inicialmente, desde la superficie inferior del elemento activo y no desde la superficie de contacto entre el palpador y la pieza.



**FIGURA 63.** Retardo del palpador.

Es necesario contar con un bloque de calibración, que tenga diferentes espesores conocidos, y es recomendado por algunos documentos que sea fabricado bajo las mismas condiciones que las de la pieza de ensayo. Los fabricantes suelen entregar un bloque certificado, fabricado en un acero estructural, con el que se puede corroborar el buen funcionamiento del equipo; sin embargo para inspeccionar un material en especial, es recomendable siempre realizar la calibración sobre un bloque hecho con las especificaciones anteriores, o en su defecto sobre espesores conocidos de la misma pieza. Las siguientes imágenes muestran un bloque de calibración de pasos y un juego de bloques con espesores variados, respectivamente.

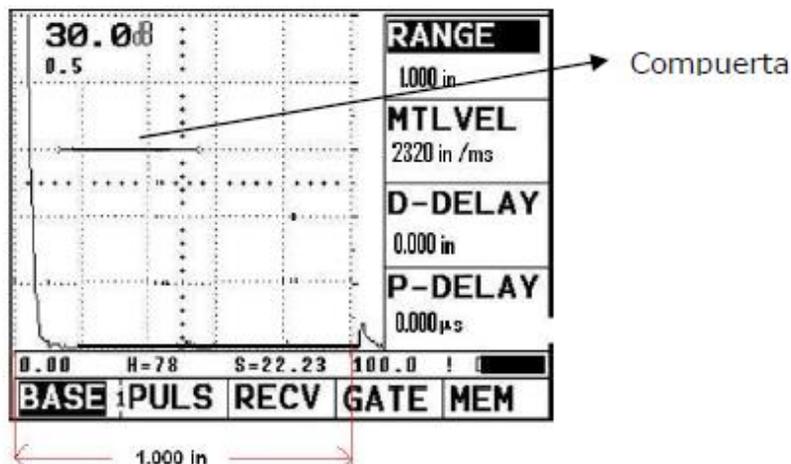


**FIGURA 64.** Bloques de calibración.

Se deben generar dos señales a diferentes distancias, con ayuda de los espesores del bloque, para configurar el equipo ultrasónico. A este tipo de calibración se le conoce como **calibración a dos puntos**, y se realiza el ajuste en un rango de espesores. Esto significa que los resultados más confiables se obtendrán en piezas que tengan un espesor que se encuentre dentro de éste rango. Para ilustrarlo mejor, según el siguiente ejemplo, se desea inspeccionar una pieza de 0.500 in de espesor, por lo que el equipo se puede

calibrar en un rango de 0.100 a 0.500 in, para garantizar que encontraremos o mediremos cualquier discontinuidad, de manera confiable, en éste rango establecido. Se deben tomar en cuenta siempre las características del palpador, debido a que cada palpador tiene un rango o alcance de inspección, afectado por variables como la frecuencia, el diámetro, y en el caso de los palpadores duales, la inclinación de los cristales.

Los primeros ajustes en el equipo serán para **el rango y la velocidad de propagación**. La velocidad en éste caso corresponderá a la velocidad longitudinal (ya que se trata de haz recto) del sonido en acero. Para éste caso se toma el valor de 0.2320 in/ $\mu$ s, que es la velocidad de propagación en acero 1020, como un valor de referencia, el cual se ajustará posteriormente para tener el valor real del material de ensayo. Por otro lado, el rango tiene que ser suficiente para permitirnos ver el eco de pared posterior en pantalla; por lo tanto si nuestra pieza tiene 0.500 in de espesor, será suficiente ajustar la escala horizontal a un valor de 1.000 in. Otros dos ajustes previos serán **el cero del palpador o retardo del palpador**, con lo que el equipo empieza a medir a partir de la cara inferior del elemento activo; y finalmente el **retardo de la pantalla** que establece el origen o cero, de la escala horizontal, en la esquina inferior izquierda de la pantalla. Dependiendo las versiones del equipo, se deberá tener cuidado de realizar más ajustes previos, como pueden ser, **el apagar la función dual**, ajustar **el ángulo del transductor a cero**, introducir los valores del voltaje y el amortiguamiento del pulso eléctrico para obtener la mejor señal, encender por lo menos **una compuerta**, encender los valores de medición que mostrara el equipo, entre algunas otras. En la siguiente imagen se muestran los ajustes de las funciones básicas.



**FIGURA 65.** Ajustes básicos en un equipo ultrasónico.

Una vez realizados los ajustes previos, se debe establecer la forma de llevar a cabo la calibración; algunos equipos proporcionan la oportunidad de hacerlo en modo automático, sin embargo los equipos básicos, requieren un ajuste de manera manual. Para la calibración manual se debe colocar primeramente

el palpador sobre el espesor menor conocido, para generar la primera señal. Para ésta primera señal, el equipo proporcionará el valor del espesor (recorrido de la onda) en la pantalla, identificado como **Sa**. Para lograr esto es importante que el accesorio llamado “compuerta” (la línea horizontal que se muestra en la imagen), toque la señal obtenida. El valor del espesor leído en **Sa** deberá ajustarse al espesor real conocido, con ayuda de la función de **retardo del palpador** (en este caso **P-DELAY**). El valor final del retardo del palpador no será relevante para el inspector, ya que únicamente garantizará que el equipo considere el inicio de la lectura a partir de la superficie de la pieza; pero si es importante que el espesor en **Sa** corresponda al espesor real, en este ejemplo corresponderá al espesor de 0.100 in.

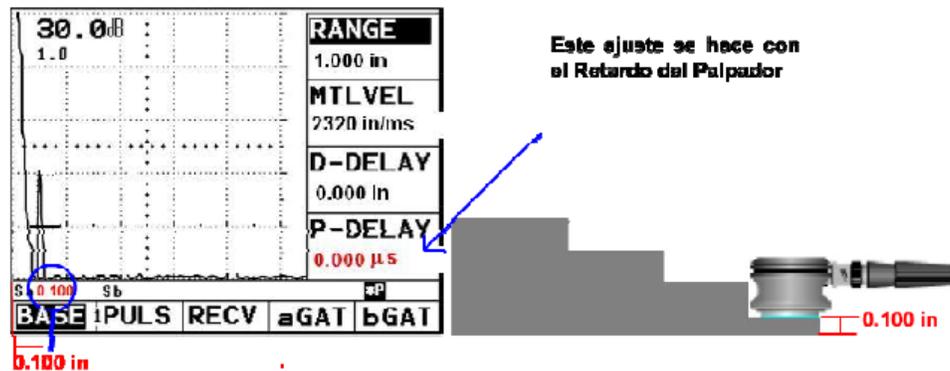


FIGURA 66. Calibración de referencia 1 con haz recto.

El siguiente paso es colocar el palpador en el espesor mayor, que en este ejemplo es de 0.500 in. Se coloca la compuerta en el eco generado y el valor leído en **Sa** debe ser aproximado a 0.500 in. Si necesita ajuste, el valor se modifica con ayuda de **la función velocidad (MTLVEL)**, que fue el valor de referencia que se introdujo anteriormente. Cuando el valor leído sea de 0.500 in, el valor de la velocidad habrá cambiado, lo que significa que se ha ajustado la velocidad real de propagación del material. De igual manera solo es relevante para el inspector el valor de **Sa**.

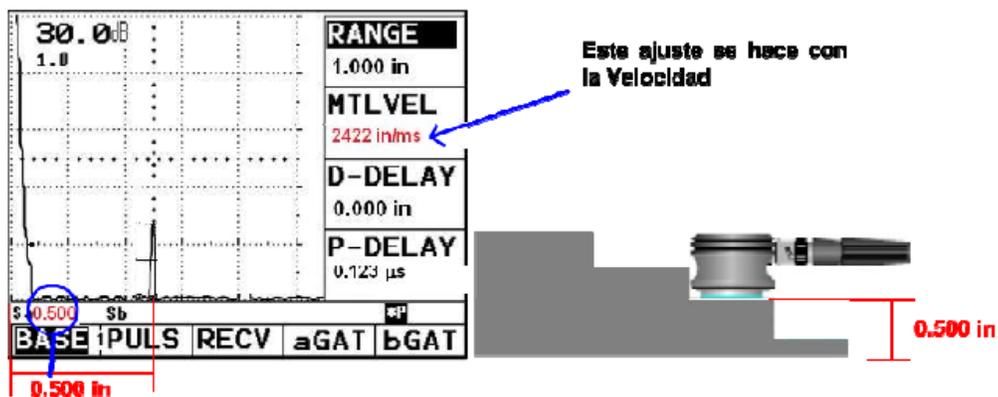


FIGURA 67. Calibración de referencia 2 con haz recto.

Este procedimiento se debe repetir las veces que sea necesario, corroborando que ambas lecturas en **Sa** correspondan al espesor medido. Con algo de práctica la calibración manual no debe tomar más de cinco minutos para realizarla. Para los equipos que cuentan con calibración automática, únicamente se les proporcionan los dos valores de referencia (espesores) y el equipo ajustará automáticamente los valores del **retardo del palpador y la velocidad**.

#### **3.6.1.1.1 Inspección con haz recto.**

Para realizar inspecciones con haz recto se requiere un palpador de un cristal o dos cristales, dependiendo la aplicación, ya sea detección de fallas o medición de espesores, respectivamente. El método de acoplamiento comúnmente utilizado, en las inspecciones generales es el contacto entre el palpador y la pieza de ensayo, y la técnica de inspección más utilizada es denominada Pulso-Eco, es decir, el transductor emite una onda ultrasónica a través del material, y cuando la onda encuentra a su paso una interfase acústica o algún reflector o discontinuidad, esta onda regresa a la fuente emisora. Los equipos de ultrasonido se encargan de emitir y recibir señales eléctricas provenientes del transductor, las cuales son graficadas en pantalla en una presentación llamada “**A scan**”.

Una presentación A-scan esta compuesta por un sistema de dos ejes; el **eje vertical** representa la cantidad de energía que la onda va perdiendo mientras recorre el espesor de la pieza de ensayo. Esta escala esta seccionada en cinco o diez divisiones; la altura máxima de la escala representa el 100% de energía. La altura que alcanza una señal en esta escala, puede ser regulada con un **control de amplitud** o **ganancia de la señal**, el cual contienen todos los equipos ultrasónicos. **El control de ganancia** se modifica en unidades de decibeles (**dB**), unidad relativa empleada en acústica para expresar la relación entre dos magnitudes acústicas o entre la magnitud que se estudia y una magnitud de referencia. Es la principal unidad de medida utilizada para el nivel de potencia o nivel de intensidad del sonido.

Por otro lado el **eje horizontal** esta seccionada en cinco o diez divisiones, divididas a su vez en cinco subdivisiones cada una (que pueden ser configuradas dependiendo el equipo que se utilice). Representa el tiempo que tarda la señal ultrasónica en recorrer el material, desde su emisión hasta el momento en que encuentra un reflector o interfase acústica para regresar nuevamente a la fuente emisora. Los equipos ultrasónicos traducen este tiempo, al que también se le conoce como tiempo de vuelo (Time of Fly), en unidades de longitud, es decir la escala horizontal nos muestra el recorrido de la onda (emisión y recepción), dividida entre dos, para mostrar el espesor del material; la función que permite configurar esta escala es **el rango o campo**.

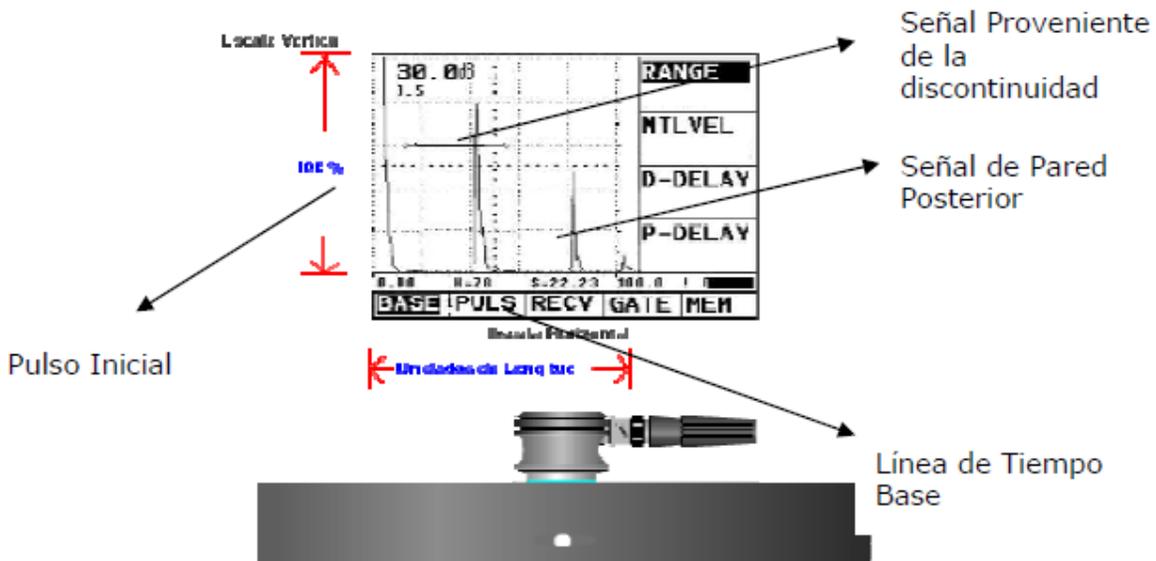
En este tipo de inspecciones existe siempre una señal, ubicada cerca del costado izquierdo de la pantalla, la cual es generada por las variaciones existentes en el campo cercano del haz ultrasónico. Esta señal es conocida como **pulso inicial** y es un obstáculo para la detección de discontinuidades cercanas a la superficie. Es una característica de los transductores que presenten un pulso inicial mayor, mientras se aumenta la frecuencia y se disminuye su tamaño. Para estos casos es muy común encontrar accesorios que

ayudan a disminuir los efectos del pulso inicial, llamados **líneas de retardo**, y sirven para alojar esta señal dentro de ellas, colocándolas en la superficie de contacto del palpador. Además de esta función, las líneas de retardo también evitan el desgaste prematuro de los transductores y algunas soportan altas temperaturas, además pueden ser maquinadas para lograr un mejor acoplamiento en alguna superficie curva.



**FIGURA 68.** Línea de retardo.

La presentación en A-scan tiene otras características que se pueden identificar fácilmente, como es una línea continua que se muestra, cerca de la base de la pantalla, cuando aún no se ha acoplado el palpador sobre la pieza, llamada **línea de tiempo base**; una vez que hay contacto y que la onda encuentra un reflector, aparece una señal a la distancia en que se encuentra el reflector. La siguiente imagen representa la detección de una discontinuidad en un material, mostrada en la pantalla del equipo.



**FIGURA 69.** Detección de una discontinuidad con haz recto.

### 3.6.1.1.2. Detección de discontinuidades.

Una vez que se ha realizado la calibración en distancia del equipo, se puede proceder a inspeccionar una pieza. Para el ejemplo anterior, la pieza tiene un espesor de 0.500 in, el equipo se calibró en un rango de 0.100 a 0.500 in, lo que nos garantiza encontrar y medir posibles discontinuidades en este rango. La siguiente imagen ilustra la detección de una discontinuidad en esta pieza. Se puede ver que la discontinuidad impide el paso del ultrasonido hasta la pared posterior, es por eso que en el equipo solo se puede ver un eco producido por la discontinuidad. Además se muestra la profundidad a la que se encontró la interrupción y se puede leer el valor en **Sa**. Si se desea conocer el tamaño exacto de una discontinuidad, se puede recurrir a otros ajustes de comparación con reflectores conocidos. Estos ajustes se discuten más adelante con mayor detalle.

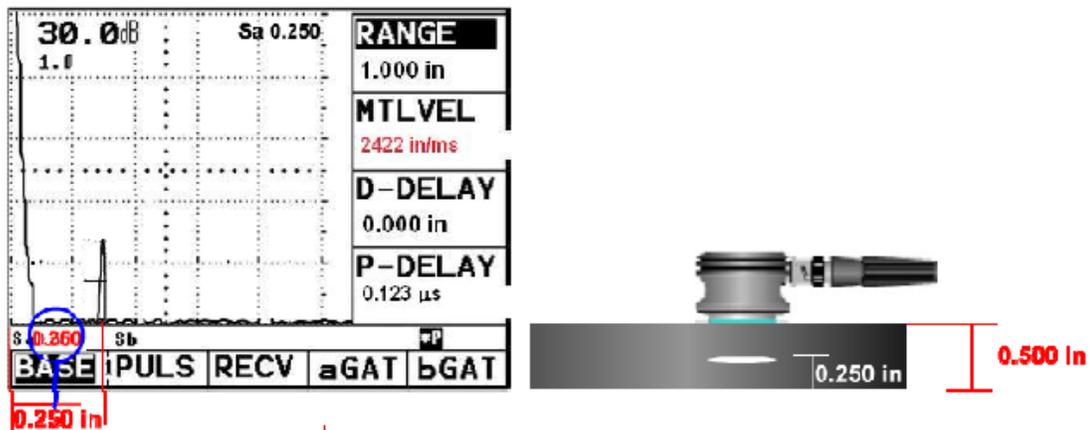


FIGURA 70. Detección de una discontinuidad con haz recto.

La localización de defectos en un material de ensayo está en función de la detectabilidad, que corresponde a la habilidad de un sistema de inspección ultrasónica para detectar la presencia de una discontinuidad. La detectabilidad está determinada por una serie de variables tanto de la pieza que está siendo inspeccionada como de la propia discontinuidad.

#### 3.6.1.1.2.1. Variables de la pieza inspeccionada.

a) **Condición superficial:** La rugosidad superficial y superficies con pintura mal adherida, óxido o corrosión pueden alterar los resultados de la inspección y pueden evitar que se realice una inspección completa debido a que se produzca dispersión del ultrasonido o por que exista un mal acoplamiento, lo anterior puede causar:

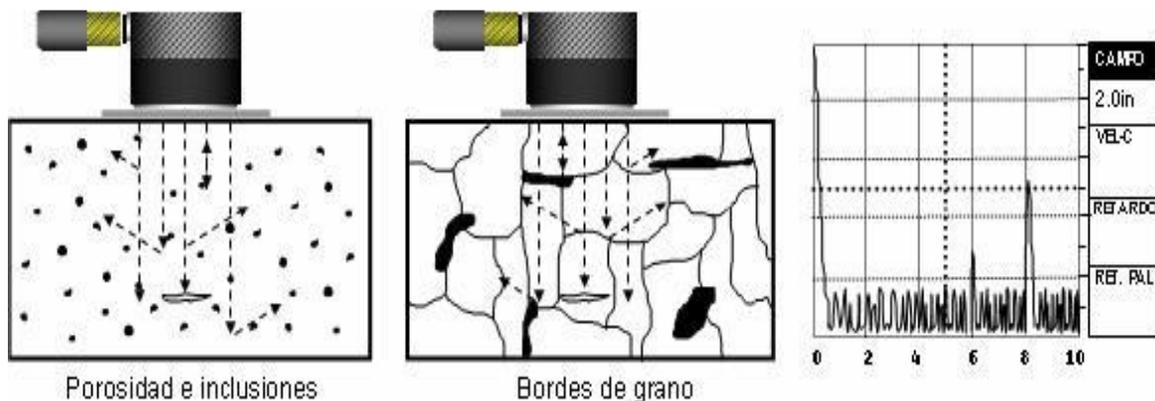
- a) Pérdida de amplitud de indicaciones de discontinuidades.
- b) Pérdida del poder de resolución debido al incremento en la longitud del campo muerto.
- c) Un haz ultrasónico muy ancho debido a la dispersión desde la superficie.

Para minimizar estos efectos podrían ser removidos tanto la pintura, el óxido y la corrosión, antes de realizar la inspección.

**b) Geometría de la pieza:** Cuando la superficie posterior no es paralela a la superficie frontal, o cuando la divergencia del haz alcanza una superficie lateral de la pieza, se puede producir dispersión y conversión de modo, por lo cual se pueden generar indicaciones sobre la pantalla del instrumento que puedan crear confusión. En la inspección de piezas con superficies paralelas es importante monitorear la reflexión de pared posterior para evaluar y asegurar que la onda ultrasónica pasa adecuadamente a través de la pieza.

**c) Superficies de acoplamiento curvas:** Cuando la superficie de acoplamiento es curva se pueden presentar problemas debido a la energía de la onda ultrasónica que regresa al transductor, por ejemplo, si es una superficie cóncava la onda podría ser focalizada, y si es una superficie convexa la onda podría ser dispersada en forma de un haz ancho. Si la superficie de la pieza es curva, más allá de ciertos límites, se puede requerir el uso de zapatas con superficie curva.

**d) Estructura interna de la pieza:** Como sabemos, discontinuidades inherentes de la pieza y los bordes de grano pueden producir dispersión de la onda ultrasónica, esto reduce la energía disponible para la detección de discontinuidades y como consecuencia la amplitud de sus indicaciones, y además, produce señales en la pantalla del instrumento conocidas como “*ruido*” o “*grama*”, que causan interferencia (**relación señal-ruido**), ver la siguiente figura. Este problema es mayor cuando se incrementa la frecuencia y es más notable en materiales con estructura de grano grande.

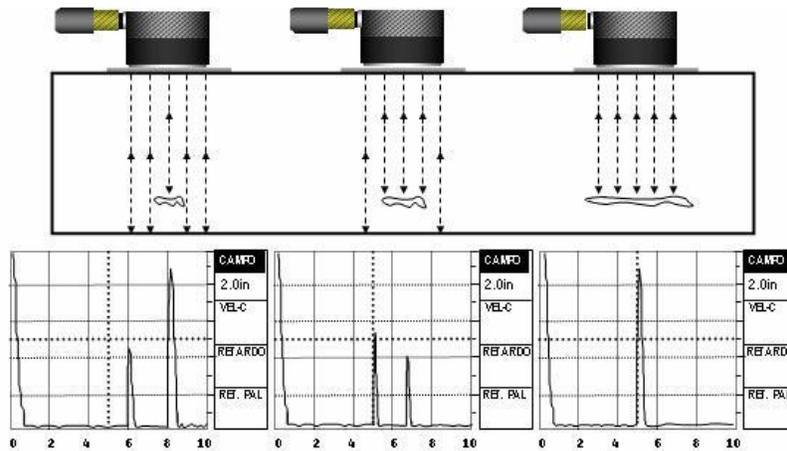


**FIGURA 71.** Relación Señal – Ruido.

### 3.6.1.1.2.2. Variables de la discontinuidad.

**a) Tamaño de la discontinuidad:** Para que una discontinuidad pueda ser detectada, en teoría, debe tener un tamaño igual o mayor a media longitud de onda. Se puede determinar el tamaño de discontinuidades teóricamente detectables utilizando la fórmula que relaciona la longitud de onda, la frecuencia y la velocidad acústica. Por otro lado, para discontinuidades perpendiculares a la dirección en la que viaja la

onda ultrasónica, la reflexión de la onda, producida por la discontinuidad, y la amplitud de la indicación en la pantalla del instrumento, se incrementan si el área de la discontinuidad, perpendicular a la dirección de la onda, se incrementa y viceversa, como se muestra a continuación.



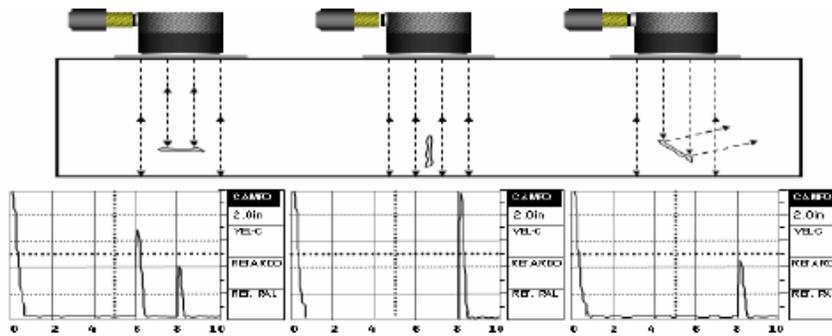
**FIGURA 72.** Tamaño de la discontinuidad.

**b) Impedancia acústica:** La relación de impedancias acústicas, entre la pieza inspeccionada y las discontinuidades presentes, es muy importante. La reflexión de la energía ultrasónica es mayor si la diferencia en valores de impedancias es mayor y la reflexión de la energía ultrasónica es menor si la diferencia en valores de impedancias es menor, debido a lo anterior, se considera que lo mejor es que una discontinuidad contenga aire.

**c) Dispersión del haz producida por la discontinuidad:** La energía de una onda ultrasónica puede ser dispersada por una discontinuidad, esta dispersión puede incrementarse debido a:

- a) La reducción en la frecuencia utilizada en la inspección.
- b) El incremento en la rugosidad superficial de la discontinuidad.
- c) La reducción en el tamaño de la discontinuidad.

**d) Orientación de la discontinuidad:** La mejor orientación de una discontinuidad, para que sea fácilmente detectada, es que se encuentre perpendicular a la dirección en la que viaja la onda ultrasónica. Para ayudar a identificar la presencia de discontinuidades que no son perpendiculares con respecto a la dirección de la onda ultrasónica, y si la geometría lo permite, se puede monitorear la reflexión de pared posterior. Una reducción en la reflexión de pared posterior acompañada por una o varias indicaciones de baja amplitud pueden indicar la presencia de una o varias discontinuidades con diferentes orientaciones. La siguiente figura ilustra el efecto de la orientación sobre la detectabilidad.



**FIGURA 73.** Orientación de la discontinuidad.

En resumen, es muy importante controlar las condiciones que pueden afectar una inspección con haz recto; para poder obtener resultados satisfactorios. Este estudio estará a cargo de un nivel III y deberá ponerse a consideración de los interesados como clientes, proveedores o fabricantes, con el fin de aprobar y calificar un procedimiento de inspección.

### 3.6.1.2. Calibración con haz angular.

Antes de llevar a cabo cualquier tipo de inspección, siempre es necesario realizar el ajuste del instrumento ultrasónico. En la inspección con palpador de haz angular, la calibración también es siempre necesaria.

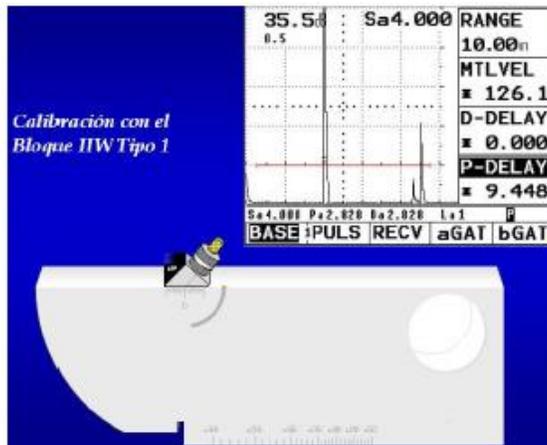
Recordemos que, para calibrar un instrumento ultrasónico, se necesitan al menos dos ecos de referencia. El procedimiento de calibración es el mismo que el empleado con haz recto; se ajustan los dos ecos de referencia con **el retardo del palpador y la velocidad**, respectivamente. En general son usados dos métodos para la calibración con palpador de haz angular:

**a. Método por coordenadas polares:** El método por coordenadas polares requiere la medición de la línea central del haz en la interfase palpador / pieza, y del ángulo de refracción del haz en un bloque de calibración. El barrido del instrumento es calibrado a lo largo de la línea central del haz. La información de la inspección es gráficamente convertida en coordenadas de posición y profundidad para la localización del reflector.

Para la calibración en distancia se recurre al radio y la superficie reflectora de un arco, con una longitud de al menos 90°, ya que la respuesta es igual para todos los ángulos. Para la calibración en **sensibilidad-amplitud** se utilizan barrenos laterales paralelos a las superficies y perpendiculares al recorrido del ultrasonido y, en ciertos casos, ranuras superficiales. Bajo ciertas circunstancias, la calibración de sensibilidad-amplitud debe ser corregida debido a variaciones de acoplamiento y efectos de la distancia y la amplitud.

Para la calibración con el método por coordenadas polares se puede recurrir al uso de los bloques de calibración del tipo Instituto Internacional de Soldadura (IIW) y otros tipos de bloques de calibración diseñados para la inspección ultrasónica. El propósito de utilizar estos bloques es facilitar el ajuste y la calibración del equipo ultrasónico detector de fallas.

Para calibrar en el bloque IIW tipo 1, es importante conocer la distancia de las señales de referencia, para seguir con el procedimiento explicado para haz recto. Las distancias con el palpador colocado en la siguiente posición, son de 4 in y 9 in respectivamente, y son obtenidas por el rebote de la onda ultrasónica en las diferentes interfases acústicas, como son la curvatura del bloque y la ranura inferior. Con esto ajustamos el equipo en un rango de 4 a 9 in; si se desea un rango menor, solo se coloca el palpador en una posición inversa y las nuevas distancias serán de 1 in y 6 in respectivamente.



**FIGURA 74.** Calibración con haz angular y bloque IIW.

Los bloques pueden ser usados para:

- La calibración del barrido.
- El ajuste de la energía del pulso y la amplificación.
- La confirmación de la estabilidad y la operación adecuada del instrumento.
- La determinación de las características de los transductores, como su sensibilidad y, en el caso de los palpadores, la localización del punto índice de salida del haz, la longitud del recorrido en la zapata y el ángulo de refracción.

Los bloques del tipo IIW son primeramente intentados para caracterizar y calibrar sistemas de haz angular, y también cuentan con características para usos tales como la verificación de la resolución y sensibilidad con haz recto. Otros bloques, además de aquellos derivados del bloque de calibración IIW 1, pueden ser utilizados para la calibración en distancia y sensibilidad. Estos bloques son: el bloque para calibración en distancia tipo DC, el bloque para calibración en sensibilidad tipo SC, el bloque para calibración en distancia y sensibilidad tipo DSC y el bloque miniatura para calibración de haz angular

(versión de EU para el bloque de calibración IIW 2, pero con variaciones significativas), MAB por su nombre en Inglés.



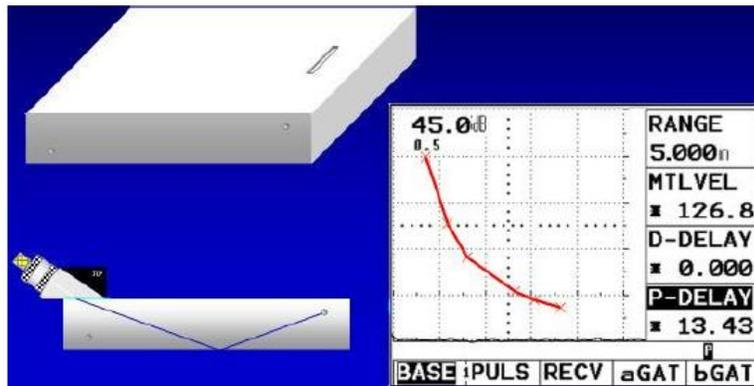
**FIGURA 75.** Calibración con haz angular y bloque DSC.

**b. Método por coordenadas rectangulares:** El método por coordenadas rectangulares requiere la medición de la posición del reflector desde el frente del transductor, el barrido del instrumento es calibrado para la profundidad del reflector conforme es movido a diferentes posiciones en el haz, proporcionando una curva de distancia amplitud (curva DAC). La información de la inspección se lee directamente para la posición y profundidad hasta el reflector.

Este método cubre:

- La calibración del rango de barrido, sobre el rango de inspección.
- La calibración en sensibilidad.
- La calibración de distancia-amplitud (curva DAC).
- La calibración de la posición de la profundidad con respecto a la parte frontal del palpador y la superficie de inspección.
- Comparación de la resolución de diferentes sistemas de inspección.
- Corrección de la calibración para reflectores planos perpendiculares a la superficie de inspección o cercanos a la superficie.
- La divergencia del haz.

Para la calibración son usados juegos de barrenos laterales, paralelos a la superficie y perpendiculares al recorrido del ultrasonido, y ranuras superficiales. Los reflectores pueden ser colocados en un bloque fabricado con el exceso de la soldadura o de un material similar y del mismo espesor. Los diámetros de los barrenos cambian con el espesor de la soldadura. Los barrenos son colocados a 1/4, 1/2 y 3/4 del espesor del bloque y las ranuras sobre dos superficies opuestas, las de mayores dimensiones.



**FIGURA 76.** Ajuste con barrenos laterales para curva DAC.

Como **Nota**, en general, es importante señalar que las esquinas cuadradas de los bloques de calibración no deberían ser utilizadas para realizar la calibración en distancia ni, mucho menos, para la calibración en sensibilidad.

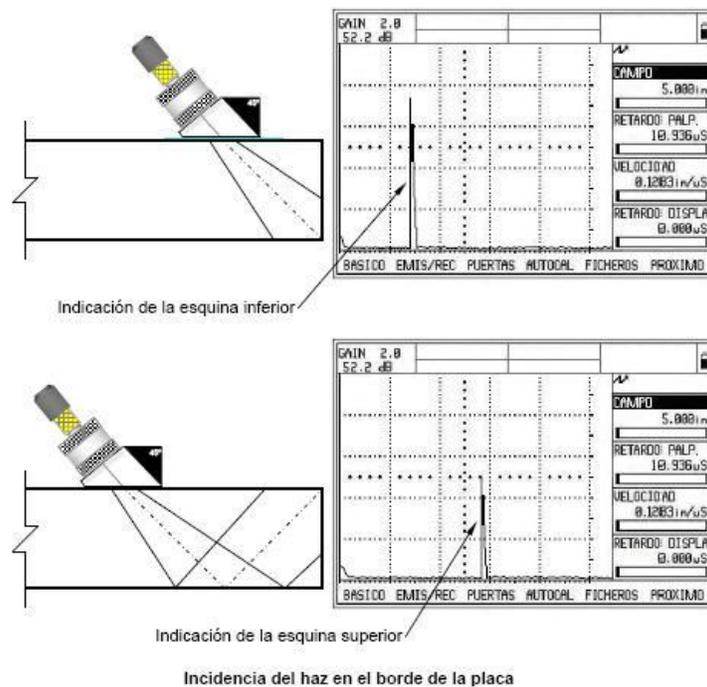
### 3.6.1.2.1. Inspección con haz angular.

Cuando un palpador de haz angular, que esté conectado a un equipo de ultrasonido, se acopla sobre la superficie de una placa, el haz de ondas longitudinales emitido por el cristal del palpador se refracta al atravesar la interfase, convirtiéndose en un haz de ondas de corte. Éste haz se propaga en “zig-zag” a través de la placa como se ilustra en la siguiente figura.



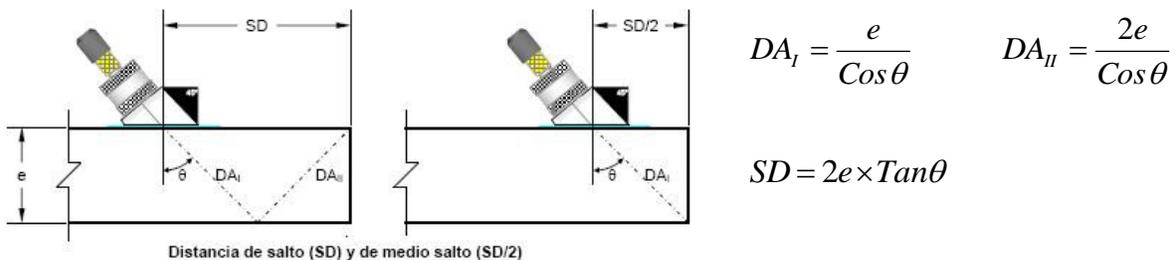
**FIGURA 77.** Propagación de las ondas de corte.

Si en su camino el haz de ondas de corte no encuentra ningún reflector con orientación favorable, continuará su propagación a través de la placa y en la pantalla no habrá ninguna indicación. Imaginemos ahora que el haz de ondas de corte incide en el borde de la placa, como se ve en las siguientes figuras. En éste caso, aparecerá un eco en la pantalla y, siempre que el rango elegido en el equipo sea el adecuado, la reflexión se producirá bien cuando el haz incida en la esquina inferior o bien cuando incida en la esquina superior.



**FIGURA 78.** Incidencia de la onda transversal en el borde de una placa.

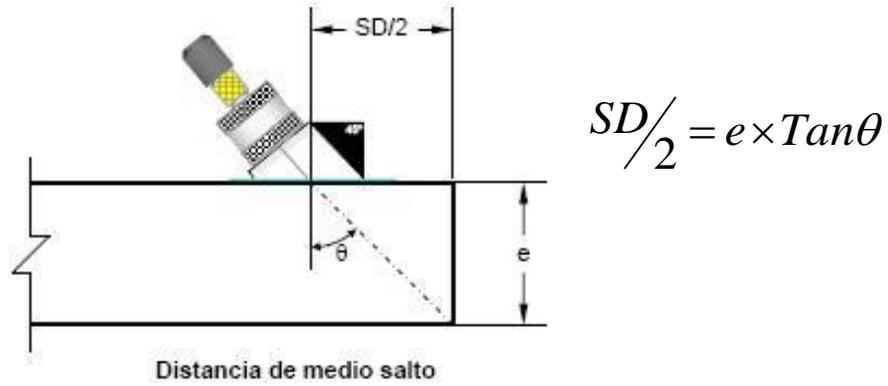
De lo anterior se deduce que se pueden obtener las reflexiones correspondientes a las esquinas inferior y superior, del borde de la placa, sin más que situar el palpador de forma que el haz incida primeramente en la esquina inferior y después en la esquina superior (después de haber sufrido una reflexión en la superficie inferior de la placa). La reflexión en la esquina inferior del borde de la placa se produce a una distancia que identificaremos como  $SD/2$ , entre el punto de salida del haz del palpador y el borde de la placa, y la reflexión en la esquina superior se produce a una distancia  $SD$ , veamos ahora la siguiente figura.



**FIGURA 79.** Salto y medio salto.

Como se puede observar en el lado izquierdo de la figura, por la forma en “V” del recorrido del haz ultrasónico hasta completar la  $SD$ , se le da el nombre de “*Trayectoria en V*”. La distancia recorrida por el haz ultrasónico hasta la superficie inferior de la placa ( $DA_I$ ) se conoce como la “*Primera Pierna*” de la trayectoria en “V”, y la distancia desde la superficie inferior hasta la superior ( $DA_{II}$ ) es la segunda

pierna, y así sucesivamente. Con base ahora en la figura siguiente, se puede deducir que el haz barre toda la sección transversal de la placa al desplazar el palpador entre las distancias **SD** y **SD/2**. A la distancia **SD** se le denomina “*Distancia de Salto*”, o distancia brinco (por su nombre en Inglés: **Skip Distance**) y a **SD/2**, “*Distancia de Medio Salto*”. Conociendo el ángulo de refracción del haz ultrasónico, marcado en el palpador, y el espesor se pueden calcular las distancias **SD** y **SD/2**.



**FIGURA 80.** Medio salto.

### 3.7. Bloques de calibración (tipos y uso).

En el ensayo de ultrasonido, todas las indicaciones de discontinuidades son comparadas con las recibidas de un bloque de calibración. Estos son utilizados para estandarizar los equipos ultrasónicos en ensayos a piezas en general.

La estandarización se realiza por dos razones que son:

- Chequear que el conjunto equipo-palpador trabaje como se requiere.
- Seleccionar el nivel de sensibilidad o ganancia requerida para detectar las discontinuidades según sus dimensiones en la pieza de ensayo.

La evaluación de las discontinuidades se efectúa por comparación de sus indicaciones con las recibidas de una discontinuidad artificial de dimensiones conocidas, a la misma profundidad y en un bloque de referencia del mismo material.

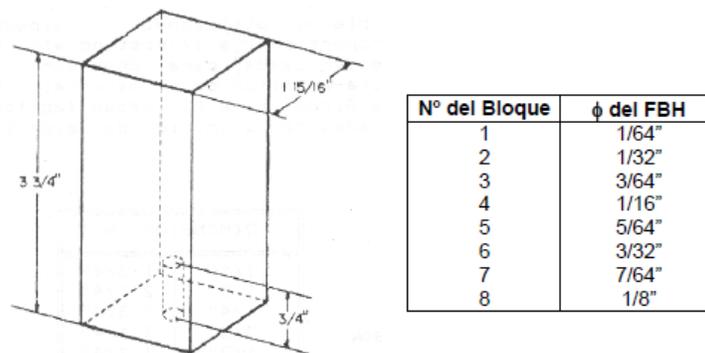
La razón por la cual los bloques de calibración son hechos del mismo material por que es necesario reproducir las mismas condiciones de atenuación del sonido, tamaño de grano, tratamiento térmico, configuración y características generales presentes en el material de la pieza de ensayo.

Entre los bloques de calibración más comúnmente usados, se encuentran cuatro tipos que son:

- Alcoa Serie A, que es un set de bloques área-amplitud.
- Alcoa Serie B, set de bloques distancia-amplitud, también son conocidos como Hitt.
- Serie ASTM E-127 (American Society for Testing Materials), set de bloques área-amplitud y distancia-amplitud.
- Bloques I.I.W. (International Institute of Welding), bloque V-1, bloque V-2.

### 3.7.1. Set de bloques ALCOA Serie A.

El set de bloques Alcoa Serie A, set de bloques de calibración área-amplitud, consta de ocho bloques de superficie cuadrada de lado igual a  $1 \frac{15}{16}$  pulgadas y con una longitud de  $3 \frac{3}{4}$  pulgadas. A  $\frac{3}{4}$  de pulgada de profundidad, desde la superficie posterior, se encuentra una superficie de fondo plano "FBH" (flat bottom hole), taladrado en el centro del bloque. Los diámetros de los agujeros de fondo plano van desde  $\frac{1}{64}$  de pulgada, en el bloque N° 1, hasta  $\frac{1}{8}$  de pulgada ( $\frac{8}{64}$  de pulgada), en el N° 8. El set de bloques Alcoa Serie A, está fabricado en base a barras forjadas de aluminio de aleación ligera 7075-T6 (ver figura 81).

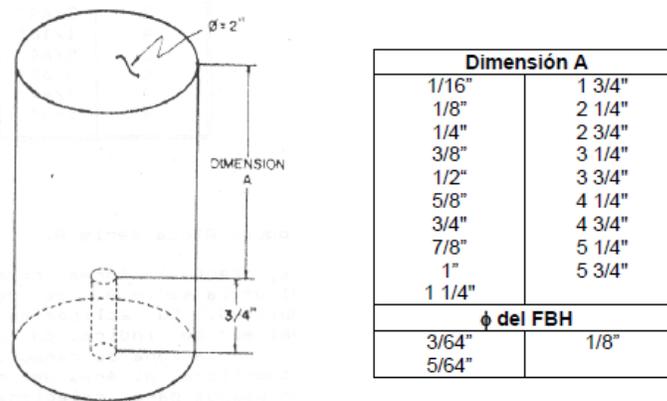


**FIGURA 81.** Set de bloques ALCOA Serie A.

En la figura vemos, tanto la forma como las dimensiones de los bloques Alcoa Serie A, set de bloques de calibración área-amplitud. Su aplicación esta basada en que la amplitud del eco de indicación de un agujero de fondo plano "FBH", en la zona de campo lejano del haz de un palpador, es proporcional al área del mismo. Entonces, estos bloques son usados para relacionar la amplitud de la señal con el área de la discontinuidad, asumiendo siempre que no existan pérdidas causadas por rugosidad superficial.

### 3.7.2. Set de bloques ALCOA Serie B.

El set de bloques Alcoa Serie B, o Hitt, set de bloques de calibración distancia amplitud, consta de diecinueve bloques de 2 pulgadas de diámetro, con agujeros cilíndricos de fondo plano, todos del mismo diámetro. Sin embargo, pueden ser obtenidos en el mercado, tres juegos con tres diámetros de agujeros de fondo plano diferentes ( $\frac{3}{64}$  de pulgada,  $\frac{5}{64}$  de pulgada y  $\frac{1}{8}$  de pulgada). La profundidad de los agujeros de fondo plano es  $\frac{3}{4}$  de pulgada desde la superficie posterior. Las distancias, desde la superficie superior o de prueba del bloque hasta los agujeros de fondo plano, varían desde  $\frac{1}{16}$  de pulgada, hasta  $5 \frac{3}{4}$  pulgadas (ver figura 82).



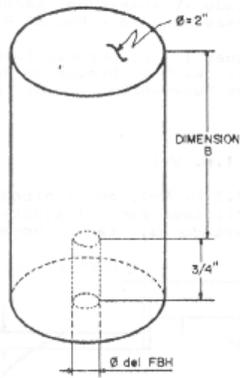
**FIGURA 82.** Set de bloques ALCOA Serie B.

En la figura se muestra un juego de bloques Alcoa de la Serie B, set de bloques de calibración distancia-amplitud. Por teoría de la onda ultrasónica podemos saber que la disminución de la amplitud del eco, para una superficie de agujero de fondo plano, utilizando un palpador con cristal circular, es proporcional a 1,2,3.... (distancia). La Serie de bloques B puede ser usada para chequear las características en distancia- amplitud de un material. Al igual que el set de bloques Alcoa Serie A, están fabricados en base a barras forjadas de aluminio de aleación ligera, 7075-T6.

Cada bloque se encuentra identificado por un código numérico que consta de cinco dígitos. El primer dígito identifica el diámetro del agujero de fondo plano, y los cuatro dígitos restantes se refieren a la distancia existente desde la superficie de prueba hasta el agujero de fondo plano. Por ejemplo: un bloque Alcoa Serie B identificado con el código 3-0075, tiene un diámetro de agujero de fondo plano de 3/64 de pulgada y una distancia desde la superficie hasta el agujero de fondo plano igual a 0,75 o 3/4 de pulgada.

### 3.7.3. Set de bloques ASTM E-127.

El set de bloques ASTM E-127 es una combinación de bloques de calibración área amplitud y distancia-amplitud. Consta de diez bloques de 2 pulgadas de diámetro que tienen taladrado en el centro de un extremo, el orificio de fondo plano a 3/4 de pulgada de profundidad desde la superficie posterior. El primer bloque tiene un FBH de 3/64 de pulgada de diámetro, a una distancia de 3 pulgadas de la superficie de prueba. Los siete bloques siguientes tienen un diámetro de agujero de fondo plano de 5/64 de pulgada de diámetro, con distancias de: 1/8 de pulgada, 1/4 de pulgada, 1/2 de pulgada, 3/4 de pulgada, 1 1/2 pulgadas, 3 pulgadas y 6 pulgadas. Los dos bloques restantes tienen un agujero de fondo plano de 1/8 de pulgada de diámetro, con distancias de 3 pulgadas y 6 pulgadas. Al igual que los sets de bloques de calibración Alcoa Series A y B, están fabricados en base a barras forjadas de aluminio de aleación ligera 7075-T6. El set de bloques de calibración ASTM E-127, también puede ser obtenido en acero o algunas aleaciones férricas (ver figura 83).



Dimensión B	$\phi$ del FBH
3"	3/64"
1/8"	5/64"
1/4"	
1/2"	
3/4"	
7/8"	
1 1/2"	
3"	1/8"
6"	

**FIGURA 83.** Set de bloques ASTM E-127.

Los tres bloques con distancia de 3 pulgadas y diámetros de agujero de fondo plano de 3/64 de pulgada, 5/64 de pulgada y 1/6 de pulgada (8/64 de pulgada), conforman un set de bloques área-amplitud. De la misma forma, los dos bloques con distancia de 6 pulgadas y diámetros de agujero de fondo plano de 5/64 de pulgada y 1/8 de pulgada, forman otro set de bloques área-amplitud. Los siete bloques con diámetro de agujero de fondo plano de 5/64 de pulgada forman parte de un set distancia amplitud.

El set de bloques de calibración ASTM E-127 es, simplemente, una mezcla de los bloques de calibración Alcoa Series A y B, donde se ha disminuido la cantidad de bloques para simplificar la cantidad de piezas. Sin embargo, su aplicación está restringida debido al mismo factor.

### 3.7.4. Bloques de calibración I.I.W.

Los bloques de calibración I.I.W. (International Institute of Welding) son usados para la calibración tanto en distancia como en sensibilidad, según el Código de Soldadura Estructural para Acero (Structural Welding Code-Steel) de la A.W.S. (American Welding Society). Son muy útiles en el chequeo del funcionamiento, tanto de palpadores normales como de palpadores angulares, así como para evaluar la operabilidad de los equipos e instrumentos. El material de fabricación de estos bloques es especificado por el I.I.W., siendo un acero bajo en contenido de carbono y normalizado (tratamiento térmico) con un tamaño de grano según normas Mcquaid -Ehn N° 8.

Existen tres tipos de bloques I.I.W. principalmente, que son:

Bloque de calibración I.I.W. V-1, bloque de calibración I.I.W. V-2 y bloque de calibración I.I.W. para calibración en resolución.

#### 3.7.4.1. Bloque de calibración I.I.W. V-1.

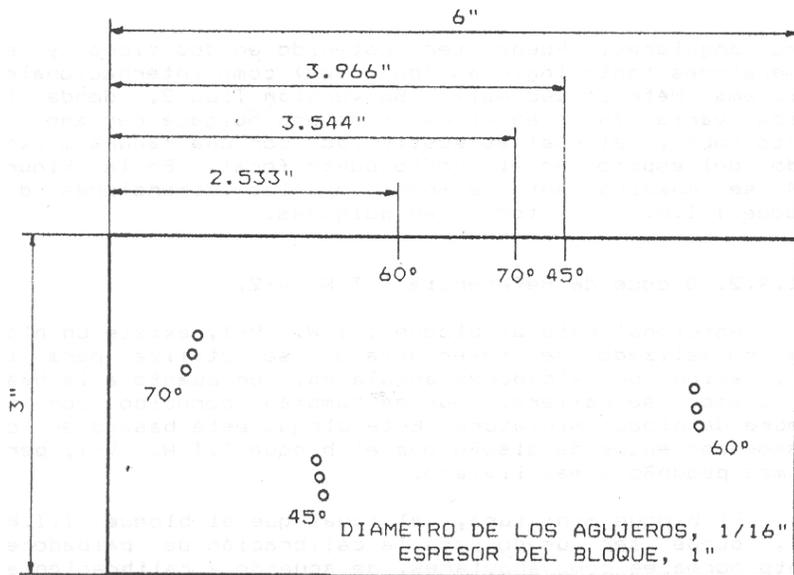
El bloque de calibración I.I.W. V-1, es el bloque de calibración por excelencia utilizado para el ajuste en distancia y sensibilidad de palpadores, tanto normales como angulares. Puede ser obtenido en dos tipos y en dimensiones tanto inglesas (pulgadas) como internacionales (Sistema Métrico Decimal). Su



En la figura 85 se muestra la forma y dimensiones del bloque miniatura. Además, éste bloque puede ser obtenido con espesores de media pulgada o una pulgada.

### 3.7.4.3. Bloque de calibración I.I.W. para calibración en resolución.

Este bloque es utilizado para la calibración en resolución de palpadores angulares con 45°, 60° y 70° de ángulo de refracción en acero. En la figura 86 se muestra el bloque con su forma, dimensiones y ubicación de los agujeros utilizados para el chequeo.



**FIGURA 86.** Bloque de calibración I.I.W. para calibración en resolución de palpadores angulares.

### 3.7.4.4. Bloques especiales.

La ejecución de los ensayos ultrasónicos, generalmente está definida por códigos o normas que estandarizan, tanto los métodos de calibración como los defectos o el "tamaño crítico de defecto" a ser ubicado en la pieza de ensayo. Así, la Sociedad Americana de Soldadura (A.W.S. - American Welding Society) especifica el uso de los bloques I.I.W. V-1 y V-2, para la calibración y ajuste de los equipos ultrasónicos en ensayos a soldaduras. Por último, existen algunos otros bloques, conocidos como bloques especiales, que son diseñados para el estudio y la calibración de los equipos y sistemas, según la aplicación específica tal como el bloque de calibración en resolución.

### 3.8. Calibración según API 5L.

Según el Instituto Americano del Petróleo (API - American Petroleum Institute), en su especificación API 5L, el bloque de referencia debe presentar entalladuras tanto en la superficie superior como en la inferior, o agujeros pasantes. Las entalladuras deben ser paralelas al eje de la soldadura, y

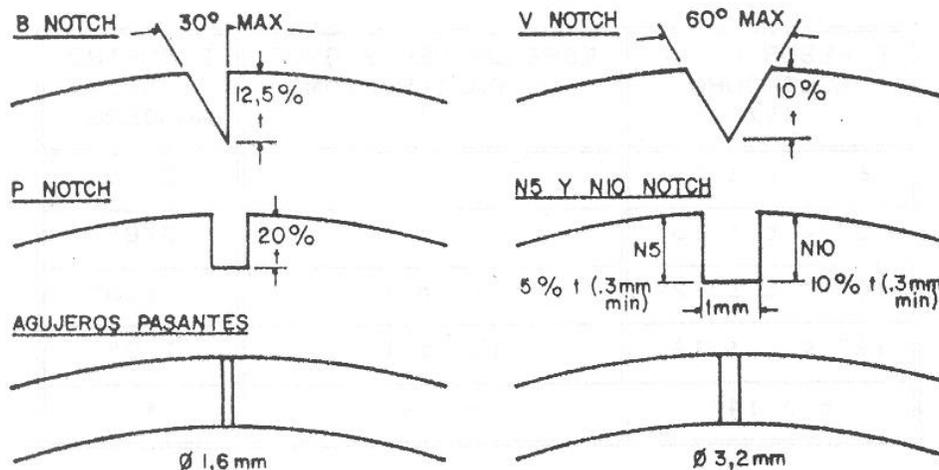
estarán separadas la distancia suficiente como para producir señales fácilmente distinguibles entre sí. Los agujeros pasantes deben ser perforados, a través de la pared, perpendicularmente a la superficie.

Los criterios de aceptación o rechazo nos remiten a la comparación de la altura de los ecos en pantalla, entre las indicaciones provenientes de las discontinuidades creadas en el bloque de referencia y las ubicadas en la pieza de ensayo, según la siguiente tabla:

Proceso de Soldadura	Tipo de Defecto		Limite de Aceptación
	Entalla	Agujero	
Soldadura por Arco Sumergido	N5	1.60 mm	100%
	Otra	3.20 mm	33%
Soldadura por Resistencia Eléctrica	N10 - V	3.20 mm	100%
	B - P	-	33%

**TABLA 3.** Criterios de aceptación o rechazo según la especificación API 5L.

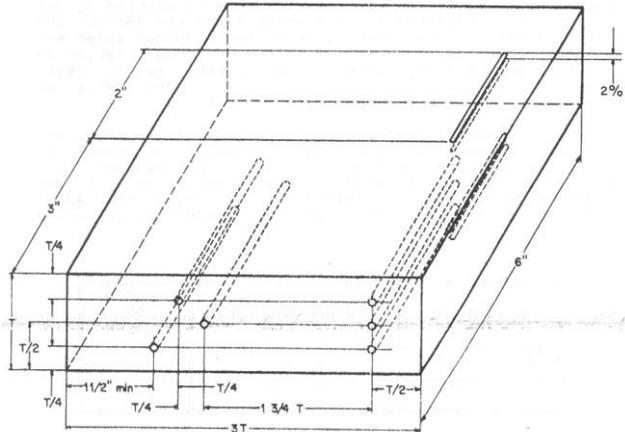
Los tipos de defecto se refieren a los presentados en la figura 87; y los límites de aceptación corresponden al porcentaje de altura de los ecos provenientes de la pieza de ensayo respecto de los obtenidos del patrón de referencia. Por ejemplo, si en juntas realizadas mediante el proceso de arco sumergido calibramos con un agujero pasante de diámetro 1,60 mm y ubicamos el eco de respuesta a un 80 % de altura de pantalla, cualquier indicación proveniente de la pieza de ensayo que sobrepase éste valor será rechazada (mayor que el 100 %).



**FIGURA 87.** Discontinuidades artificiales a crear en un estándar de referencia según API 5L.

### 3.9. Calibración según ASME.

Por su parte, la Sociedad Americana de Ingeniería Mecánica (ASME – American Society for Mechanical Engineer), establece en el Artículo 4 de la Sección V del Código sobre Calderas y Recipientes a Presión (Boiler and Pressure Vessel Code), una serie de factores que deben ser tomados en cuenta al momento de efectuar la calibración de las funciones del instrumento. De la misma forma, establece un bloque básico de calibración con una serie de discontinuidades artificiales (ver figura 88).



**FIGURA 88.** Bloque básico de calibración ASME.

El espesor "**T**" del bloque de calibración va de acuerdo con el espesor del cordón de soldadura a ser inspeccionado, aunque puede obtenerse de acuerdo con la Tabla 4, en la que se define tanto el espesor del bloque como el diámetro de los agujeros dependiendo de rangos preestablecidos del espesor "**t**" del cordón de soldadura de la pieza bajo ensayo.

**Tabla 3.** Valores del espesor "**T**" y del diámetro de los agujeros según los espesores reales del cordón de soldadura.

Espesor de la Soldadura " <b>t</b> "	Espesor del Bloque de Calibración " <b>T</b> "	Diámetro del agujero
$2'' < t \leq 4''$	$3'' \text{ ó } t$	$3/16''$
$4'' < t \leq 6''$	$5'' \text{ ó } t$	$1/4''$
$6'' < t \leq 8''$	$7'' \text{ ó } t$	$5/16''$
$8'' < t \leq 10''$	$9'' \text{ ó } t$	$3/8''$
$10'' < t \leq 12''$	$11'' \text{ ó } t$	$7/16''$
$12'' < t \leq 14''$	$13'' \text{ ó } t$	$1/2''$
$t > 14''$	-	*

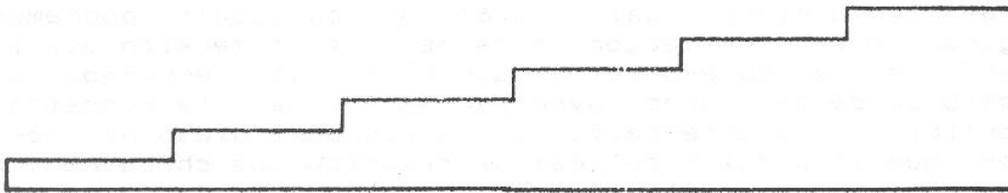
**TABLA 4.** Valores del espesor "**T**".

\*Para cada incremento del espesor “t” de dos pulgadas, el diámetro del agujero aumentará en 1/16”.

Es de hacer notar que las tolerancias permitidas en cuanto al diámetro del agujero es  $\pm 1/32$ ”, la profundidad de las entalladuras podrá variar entre 10 y  $-20\%$ , y la desviación en la ubicación del centro de los agujeros a través del espesor será  $\pm 1/8$ ”. Sin embargo, el Código ASME permite la utilización de agujeros de calibración con diámetro igual a 1/4" para espesores entre 1/2" y 2", siendo imprescindible la utilización del agujero ubicado en T/2. Para espesores mayores a 2", el diámetro de los agujeros será igual a 3/8”, requiriéndose la utilización, en cuanto a la calibración se refiere, de los agujeros ubicados a T/4, T/2 y 3/4 T.

### 3.10. Bloque escalonado.

El bloque escalonado está diseñado para la calibración de palpadores normales, y más exclusivamente de palpadores Emisor-Receptor, "E-R", para la medición de espesores. Su nombre se debe a que su forma es en escalera, tal y como se muestra en la figura 89.



**FIGURA 89. Bloque escalonado.**

Los bloques escalonados pueden ser obtenidos con diferentes dimensiones, bien sea en el sistema inglés o en el sistema métrico decimal. Dentro de los más comunes se encuentran con escalones entre 1 y 8 milímetros (8 escalones en total), y su equivalente en pulgadas; aunque existe una gama de bloques sumamente variada dentro de los cuales siempre hay uno que se ajustará a las necesidades del usuario.

### 3.11. Aplicación de los bloques calibración.

Los bloques calibración son utilizados para estandarizar los equipos ultrasónicos en ensayos a piezas en general, la estandarización se realiza por dos razones: la primera, chequear que el conjunto equipo-palpador trabaje como se requiere; la segunda, seleccionar el nivel de sensibilidad o ganancia requerida para detectar las discontinuidades según sus dimensiones en la pieza de ensayo. La evaluación de discontinuidades se efectúa por comparación de sus indicaciones con las recibidas de una discontinuidad artificial de dimensiones conocidas, a la misma profundidad y en un bloque de referencia del mismo material.

### 3.11.1. Aplicación del set de bloques ALCOA Serie A.

La aplicación del set de bloques **Alcoa Serie A**, está basada en que la amplitud del eco de indicación de un agujero de fondo plano, en la zona de campo lejano del haz de un palpador, es proporcional al área del agujero. Entonces, estos bloques son usados para relacionar la amplitud de la señal con el área de la discontinuidad, asumiendo siempre que no existan pérdidas causadas por rugosidad superficial. Cuando se detecta una discontinuidad a la misma profundidad que un agujero de fondo plano; suponiendo que la señal de indicación presente una altura en pantalla similar a la producida por el bloque N° 5 (diámetro del agujero de fondo plano igual a 5/64 de pulgada); podremos asegurar que el reflector no es menor en dimensión que la superficie de agujero del bloque N° 5. Sin embargo, el defecto puede ser mucho mayor en tamaño, pero la rugosidad superficial o la orientación de la discontinuidad no permiten que la porción del haz ultrasónico que choca contra la superficie del reflector sea reflejada contra el palpador en su totalidad.

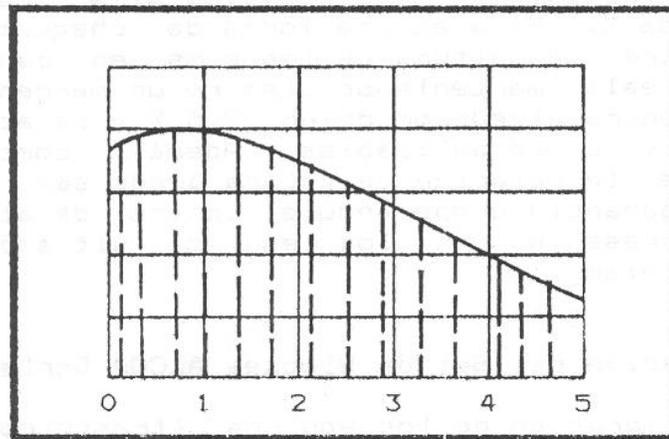
Supongamos que para la verificación lineal de un equipo de ultrasonido se ha elegido un palpador que cubre una pulgada de área a una distancia de tres pulgadas desde la cara del mismo en la zona de campo lejano. Si lo colocamos sobre el bloque N° 8 (diámetro del agujero de fondo plano igual a 1/8 de pulgada), y llevamos el eco proveniente de la superficie del agujero a una altura de pantalla igual al 80 %, si manteniendo la calibración del valor de ganancia del equipo ubicamos el palpador en el bloque N° 1 (diámetro del agujero de fondo plano igual a 1/64 de pulgada), veremos que la altura del eco proveniente del agujero ha disminuido proporcionalmente al área del mismo; o sea, de un 80 % bajará hasta un 1,25 % por lo que el eco no se observará en pantalla. Si tomamos ahora el bloque N° 4 (diámetro del agujero de fondo plano igual a 1/16 de pulgada), y manteniendo la 1era calibración existente, colocamos el palpador sobre el mismo veremos que el eco se presenta con altura de 20 % de pantalla. Si no es así, deberán ser chequeadas las condiciones de operación del equipo.

Cuando se calibra el equipo ultrasónico para que la altura de respuesta del eco sea de un 80 % para el bloque N° 8, para el resto de los bloques la altura deberá ser: N° 7 de 61,25 %, N° 6 de 45,0 %, N° 5 de 31,25 %, N° 4 de 20,0 %, N° 3 de 11,25 %, N° 2 de 5,0 %, y N° 1 de 1,25 %. Si inicialmente fijamos una altura de eco para el bloque N° 8 de 100 % en pantalla, la altura para el resto de los bloques será: N° 7 de 76,56 %, N° 6 de 56,25 %, N° 5 de 39,06 %, N° 4 de 25,0 %, N° 3 de 14,06 %, N° 2 de 6,25 % y N° 1 de 1,56 %. Esta es una forma de chequear que la relación entre la altura de los ecos en pantalla sea realmente lineal; manteniendo siempre un margen de error, que se encuentra alrededor de un 12,5 % y es aceptado por los códigos y normas aplicables. Además, como se dijo anteriormente la relación de altura puede ser modificada variando la ganancia u operando el control de atenuación o supresión, presentes en los equipos ultrasónicos que disponen del mismo.

### 3.11.2. Aplicación del set de bloques ALCOA Serie B.

La calibración de los equipos ultrasónicos mediante el set de bloques **Alcoa Serie B**, o Hitt, se basa en la relación existente entre la distancia y la amplitud, y es un poco más complicada que la efectuada por medio del set Alcoa Serie A, o set que relaciona el área de la discontinuidad con la amplitud de la señal de respuesta. Previamente, vamos a calibrar el equipo en distancia, tomando en cuenta la máxima longitud del bloque (5 – 5075). A tal fin, la distancia a medir horizontalmente en la pantalla será igual a seis pulgadas. Dependiendo del palpador y de su zona de campo cercano tendremos, que para algunos bloques, la altura del eco será deficiente de acuerdo con la ganancia previamente fijada, por lo que debemos ubicar el bloque que nos resulte en la altura de eco mayor dentro de la zona de campo lejano.

El procedimiento es el siguiente: una vez calibrada la pantalla en distancia (por ejemplo, 6 pulgadas), colocaremos el palpador sobre el bloque de menor distancia (1/16 de pulgada) y llevaremos el eco de respuesta a una altura de 80% de pantalla; luego ubicaremos el palpador sobre el bloque siguiente (1/8 de pulgada), la ganancia o mejor dicho, el nivel de ganancia deberá ser disminuido hasta que la altura del eco en pantalla sea igual al 80 %; ahora usaremos el bloque siguiente (1/4 de pulgada) y así sucesivamente hasta que obtengamos el bloque que resulte en una altura de eco de 80 %, y que con la misma graduación de ganancia, sea mayor que la respuesta del resto del set de bloques. Si mantenemos la ganancia seleccionada y probamos con todos los bloques, marcando en la pantalla los puntos de máxima altura de todos y cada uno de ellos, lograremos una curva de corrección distancia-amplitud (DAC – distance-amplitude correction), tal y como se observa en la figura 90.



**FIGURA 90.** Curva de corrección distancia – amplitud.

La curva de corrección distancia-amplitud es utilizada para definir un nivel de aceptación o rechazo, o bien un nivel de referencia, con respecto a la altura de los ecos en pantalla, provenientes de reflectores en la pieza de ensayo, según su distancia o su profundidad en las piezas a ensayar.

### 3.11.3. Aplicación del set de bloques ASTM E-127.

El set de bloques ASTM E-127 es una combinación de bloques de calibración área amplitud y distancia-amplitud. Por ser una mezcla de los sets de bloques de calibración Alcoa Series A y B, su aplicación es similar a la anteriormente expuesta sin embargo, está restringida debido a la cantidad de bloques que componen el set.

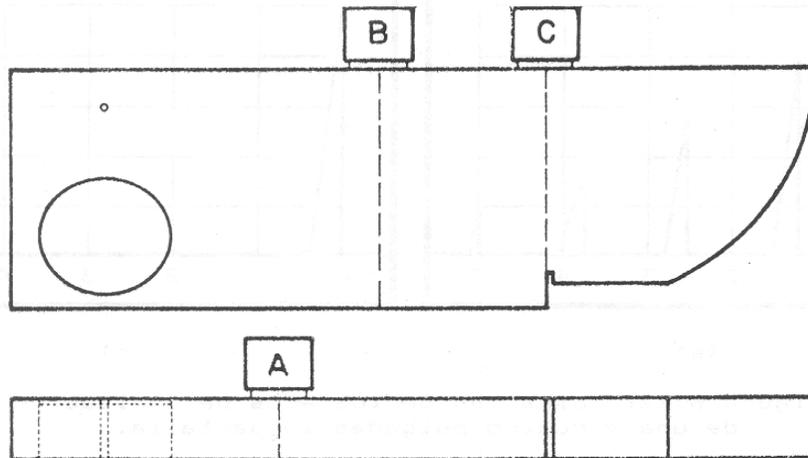
Los bloques, en éste set se encuentran identificados de la misma forma que los bloques de las Series Alcoa A y B, o sea, según el diámetro de la superficie del agujero de fondo plano y de la longitud desde la superficie de contacto hasta la reflectora.

### 3.11.4. Aplicación de los bloques de calibración I.I.W.

Como se dijo anteriormente, los bloques de calibración I.I.W. (International Institute of Welding), se utilizan tanto para la calibración en distancia como en sensibilidad, según el Código A.W.S. (American Welding Society), en ensayos mediante la técnica de contacto directo.

#### 3.11.4.1. Aplicación del bloque de calibración I.I.W. V-1.

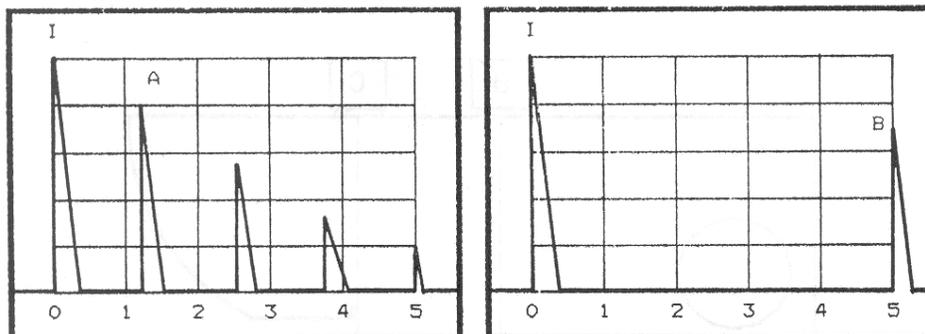
Su aplicación, en cuanto a palpadores normales, se refiere a la calibración en distancia, para lo cual se utilizan los espesores de una y cuatro pulgadas (ver figura 91 en sus posiciones A y B). Además, en la figura 91 posición C, se muestra la forma como puede ser utilizado para chequear el nivel de resolución de los palpadores normales.



**FIGURA 91.** Aplicación del bloque I.I.W. V-1 para calibración de palpadores normales.

En la figura 91 podemos observar tres posiciones para palpadores normales (A, B y C). En la posición A, el palpador está dispuesto a medir una distancia de una pulgada; y en la posición B, cuatro

pulgadas. De esta forma, puede ser efectuada la calibración del instrumento para una distancia mínima de cuatro pulgadas, con una distancia de referencia de una pulgada y la distancia máxima (ver figura 92).



**FIGURA 92.** Ubicación de los ecos de indicación de una y cuatro pulgadas en pantalla.

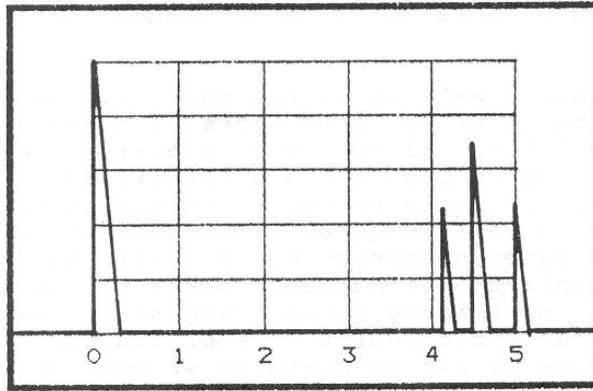
En la figura 92, se observan tres ecos. El primero corresponde al eco de emisión o inicial, “I”; el segundo (ver figura 92 a), identificado con la letra “A”, indica la distancia equivalente a una pulgada.

Nótese que entre el eco inicial y el eco “A” la distancia es la cuarta parte de la pantalla, así como los subsiguientes rebotes de fondo. Por último se observa el eco correspondiente a la posición “B” de la figura 92 (identificado con la letra B en la figura 92 b), la distancia entre el eco inicial y el eco “B” abarca toda la pantalla, y es equivalente a cuatro pulgadas.

Es importante hacer notar que cuando el palpador está ubicado en la posición “A” de la figura 91, únicamente se observarán los ecos inicial y “A” (ver figura 92 a), con los correspondientes segundo, tercero, cuarto, etc. rebotes de fondo; cuando se ubica en la posición “B”, se obtendrá el eco “B” y el eco inicial se mantendrá, tal y como se muestra en la figura 92 b.

Una vez efectuada la calibración anterior podremos chequear el nivel de resolución del palpador ubicándolo en la posición “C” de la figura 91, donde mediremos tres distancias a la vez (3.39 pulgadas, 3.64 pulgadas y 4 pulgadas; ó 85 mm, 91 mm y 100 mm) cercanas y escalonadas. Para efectuar el chequeo de resolución, el eco del primer rebote obtenido en la posición “A” (figura 92 a - eco A) debe ser llevado a una altura de pantalla entre el 50 y 75 %, así obtendremos el nivel de referencia. Manteniendo el nivel de ganancia (nivel de referencia) obtenido se procederá al chequeo de resolución.

La resolución es la habilidad que presentan los palpadores para identificar y separar las señales de indicación de varios reflectores diferentes y cercanos, en lo que a profundidad se refiere. En la figura 93 se muestran los ecos de indicación obtenidos mediante un palpador normal, ubicado en la posición “C” (chequeo de resolución) de la figura 91.

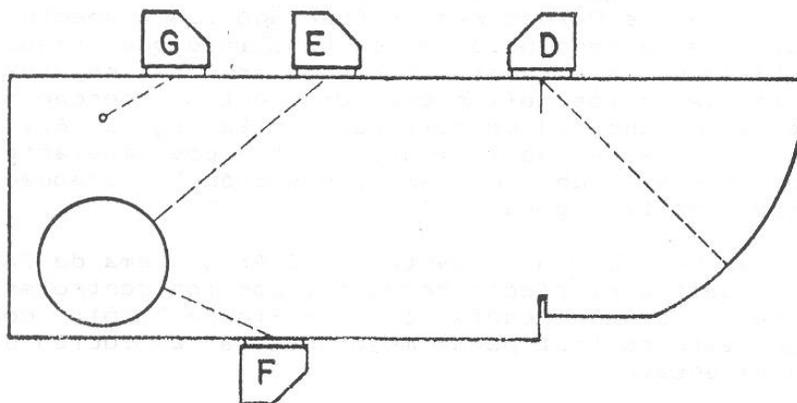


**FIGURA 93.** Ubicación de los ecos de indicación durante el chequeo de la resolución de un palpador normal.

Para la calibración y el chequeo de las condiciones de operabilidad de los palpadores angulares, se pueden utilizar tanto el bloque I.I.W. V-1 como el bloque miniatura. En cuanto al bloque I.I.W. V-1, éste puede ser usado para obtener:

- (1) El punto real de salida del haz ultrasónico.
- (2) El ángulo real del haz ultrasónico del palpador y
- (3) La calibración en amplitud o sensibilidad.

El chequeo del punto y del ángulo real de salida del haz ultrasónico, se efectúan cada vez que la zapata plástica sufre desgaste debido al roce superficial con las piezas de ensayo, o cuando el palpador no ha sido utilizado aún. En la figura 94 se muestran las diferentes posiciones de ubicación de los palpadores en el bloque I.I.W. V-1.



**FIGURA 94.** Calibración de palpadores angulares mediante el bloque I.I.W.V-1.

El punto real de salida del haz ultrasónico se obtiene colocando el palpador sobre el punto focal ubicado en el bloque I.I.W. V-1, tipo 2(ver figura 84). Si calibramos el conjunto palpador-equipo a una distancia de cuatro pulgadas en pantalla, por ejemplo, y colocamos el palpador en la posición D de la figura 94, obtendremos un eco de reflexión de pared posterior con el radio de cuatro pulgadas. Al desplazar el palpador sobre la superficie del bloque con un movimiento atrás y adelante, veremos que el eco aumentará y disminuirá su amplitud con el desplazamiento, debemos ubicar el punto en el cual el eco presente su mayor amplitud para así determinar el punto de salida del haz ultrasónico. Adicionalmente, el radio de cuatro pulgadas, utilizado anteriormente para determinar el punto real de salida del haz, puede ser utilizado para calibrar el sistema ultrasónico en cuanto a distancia se refiere.

Una vez ubicado el punto real de salida del haz ultrasónico, podemos proceder a determinar el ángulo real del haz ultrasónico del palpador. Si observamos el bloque I.I.W. V-1, tipo 2 presentado en la figura 84, veremos que posee indicaciones según el ángulo de cada palpador en sus costados. En la figura 94 se indican dos posiciones E y F, estas posiciones corresponden a las zonas donde se encuentran indicados los ángulos, y las reflexiones respectivas se producirán desde el orificio de diámetro igual a dos pulgadas que posee en su interior un relleno de plástico (plexiglás) a manera de interfase; la posición F para palpadores con ángulo de incidencia entre 40 y 60 grados, y la posición E entre 60 y 75 grados. Al igual que en el caso anterior si desplazamos el palpador sobre la superficie del bloque observaremos que la amplitud de la indicación varía con el desplazamiento, al obtener el punto de amplitud máxima obtendremos, automáticamente, el valor del ángulo del haz ultrasónico del palpador.

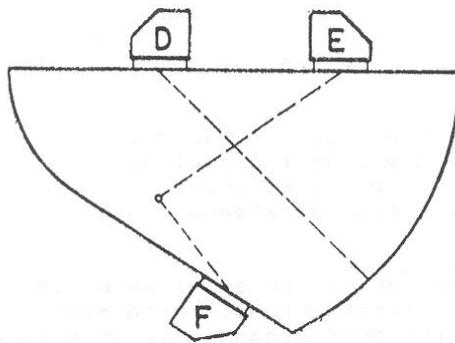
La calibración en amplitud o sensibilidad se obtiene colocando el palpador angular en la posición G de la figura 94. El palpador debe ser desplazado atrás y adelante hasta obtener la respuesta de máxima amplitud desde el orificio de diámetro 0.06 pulgadas (1,5 milímetros). Una vez obtenida la máxima respuesta se ajusta la ganancia para así determinar el nivel de referencia del sistema. La sensibilidad debe ser ajustada con una altura de pantalla de 80 %, el valor de la ganancia será el nivel de referencia.

#### **3.11.4.2. Aplicación del bloque de calibración I.I.W. V-2.**

En la figura 85 se presentó un bloque miniatura. Este bloque presenta la ventaja de ser más liviano y de menor volumen que el bloque I.I.W. V-1, pero aunque los códigos aplicables no admiten su sustitución, cumple las mismas funciones en cuanto al chequeo del funcionamiento de palpadores angulares, tales como:

- 1) Determinación del punto real de salida del haz.
- 2) Determinación del ángulo real de incidencia del haz.
- 3) Calibración en amplitud o sensibilidad.

En éste caso, la determinación del ángulo real de incidencia se realiza utilizando el orificio de diámetro 0.06 pulgadas. En la figura 95 se presentan las posiciones de los palpadores según su función en un bloque miniatura.

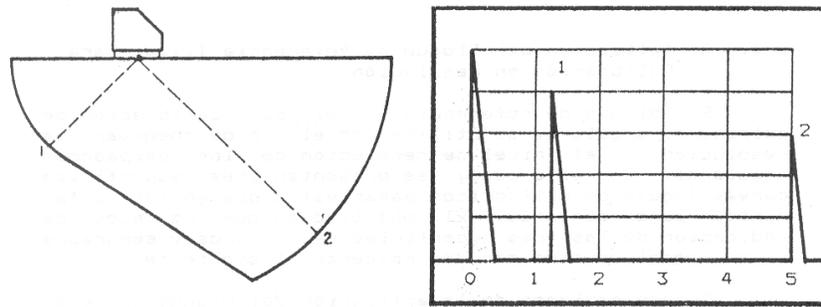


**FIGURA 95.** Calibración de palpadores angulares mediante el bloque miniatura.

Para la determinación del punto real de salida del haz, similarmente al bloque I.I.W. V-1, se coloca el palpador en la posición D; mientras que tanto para la determinación del ángulo de incidencia como para la calibración en sensibilidad se utilizan las posiciones E y F, la posición E para palpadores con ángulo entre 45 y 60 grados, y la F para palpadores con ángulo mayor a 60 grados.

La calibración en distancia puede ser realizada con el bloque miniatura a un mínimo de dos pulgadas en pantalla. Si colocamos el palpador en la posición D y ubicamos el eco de indicación al final de la pantalla (2 pulgadas), luego con el palpador invertido (midiendo hacia el radio de 1 pulgada) ubicamos el eco de respuesta en el centro de la pantalla. Así, operando los controles de desplazamiento y dilatación de la imagen en pantalla e invirtiendo el palpador hacia los radios de 1 y 2 pulgadas, llegará el momento en el cual se obtendrán los ecos en las posiciones deseadas.

En la figura 96 se muestra la ubicación de los ecos al calibrar el equipo a una distancia de cuatro pulgadas y ubicando el palpador en la posición señalada. Nótese que el eco señalado con el número 1 corresponde a la respuesta obtenida de la superficie con radio de una pulgada; sin embargo, por efecto de la interfase ubicada entre bloque y palpador, parte de la onda ultrasónica continuará su recorrido hasta la superficie ubicada a dos pulgadas de radio, será reflejada en (2) y retornará a la interfase palpador-bloque, pero por la diferencia existente entre los ángulos de la onda y del palpador no será detectada. Igualmente por efecto de la interfase, parte de la onda viajará hacia el radio de una pulgada, será reflejada en 1 y detectada por el palpador. El eco de indicación correspondiente es el señalado con el número 2, ubicado a cuatro pulgadas del eco inicial en pantalla.



**FIGURA 96.** Calibración en distancia a cuatro pulgadas para palpadores angulares con el bloque miniatura.

Si ahora calibramos el equipo a una distancia igual a cinco pulgadas y ubicamos el palpador tal y como se observa en la figura 96, obtendremos de la misma forma los ecos correspondientes a las distancias de dos y cinco pulgadas (ecos 1 y 2).

Cuando la calibración es mayor a cinco pulgadas, por cálculo matemático se puede obtener la posición correspondiente en pantalla de acuerdo a la distancia. En éste caso, los ecos se obtendrán a dos, cinco, ocho, once, etc. pulgadas de distancia en la pantalla del equipo ultrasónico; mientras que en el caso anterior, los ecos de indicación se observarán a una, cuatro, siete, diez, etc. pulgadas de distancia en pantalla.

#### **3.11.4.3. Aplicación del bloque de calibración I.I.W. para calibración en resolución.**

El bloque de calibración I.I.W. para calibración de palpadores angulares se utiliza con el fin de chequear la resolución o el nivel de resolución de los palpadores angulares. En éste caso, se presentan tres superficies curvas (agujeros cilíndricos pasantes) a distancias diferentes pero cercanas.

El objetivo es que los ecos de indicación de las tres superficies sean claros y separados y así, resolver cada eco con respecto al siguiente.

Cuando hablamos de la aplicación del bloque de calibración I.I.W. V-1, para palpadores normales (ver figura 91 - posición C), se dijo que un palpador con buena resolución debe presentar un oscilograma como el mostrado en la figura 93, correspondiente a la posición C de la figura 91.

En el presente caso ocurre exactamente lo mismo, la calidad del oscilograma debe ser similar para considerar que el palpador, angular en este caso, posee un buen nivel de resolución.

#### **3.11.4.4. Aplicación de los bloques especiales.**

Entre los bloques especiales, anteriormente descritos, se consideran: API. (American Petroleum Institute), ASME. (American Society for Mechanical Engineer) y el bloque escalonado.

### 3.11.5. Aplicación del bloque de calibración ASME.

La Sociedad Americana de Ingeniería Mecánica (ASME - American Society for Mechanical Engineer) en los Artículos 4 y 5 de la Sección V, Examinación No Destructiva (Section V -Nondestructive Examination) del Código de Calderas y Recipientes a Presión (Boiler and Pressure Vessel Code), define el uso de las curvas de corrección distancia-amplitud (DAC - Distance-Amplitude Correction) creadas a partir de señales de indicación provenientes de los agujeros ubicados a 1/4, 1/2 y 3/4 del espesor del bloque presentado en la figura 88.

La calibración del sistema se realiza obteniendo señales de indicación de todos y cada uno de los agujeros para el recorrido total del haz ultrasónico en su zona de interés. Así, se obtendrán ecos de indicación de: 1/4 T, 1/2 T, 3/4 T, 5/4 T, 3/2 T y 7/4 T, para crear la curva DAC (100 % DAC). El procedimiento de obtención de la curva DAC, es el siguiente:

Dependiendo del espesor de la pieza a ensayar, se debe calibrar la distancia de recorrido en pantalla. La calibración se hará mediante la siguiente ecuación:

$$h = \frac{2e}{\cos \alpha}$$

Donde;

$h$  = Distancia angular.

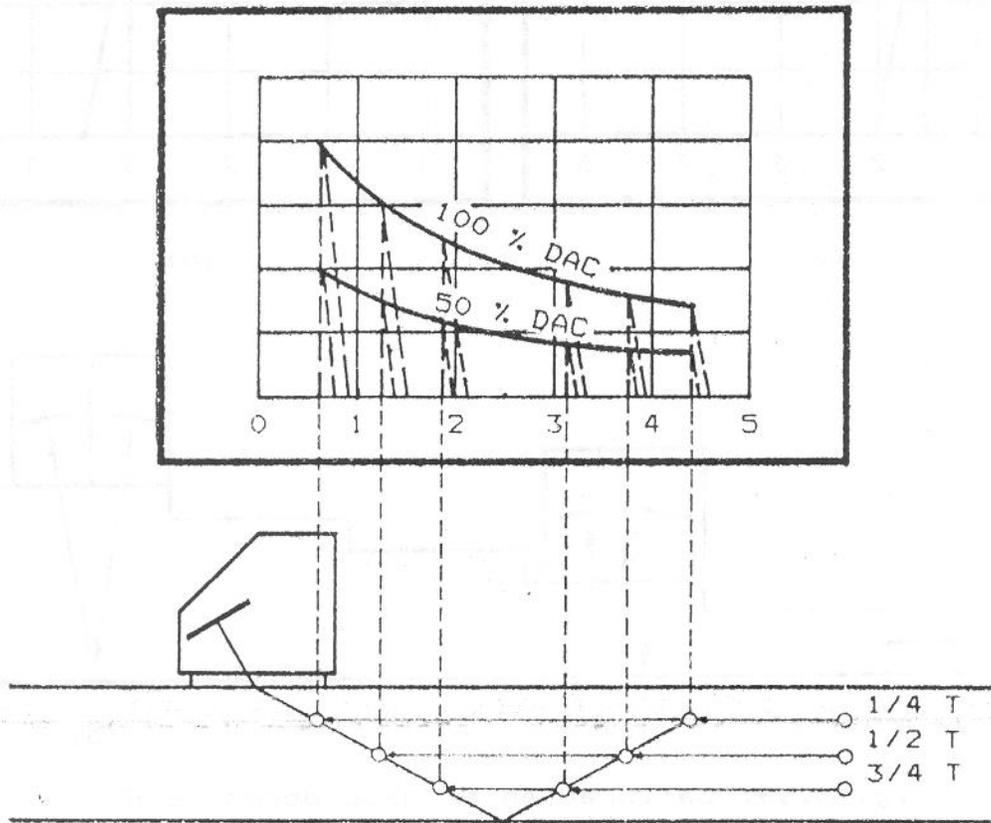
$e$  = Espesor de la pieza.

$\alpha$  = Ángulo del palpador.

Aplicando ésta ecuación, obtendremos la distancia de recorrido del haz ultrasónico para un paso completo. Se debe obtener ahora el eco de indicación de cualquiera de los agujeros, que resulte en la mayor altura de pantalla y lo ubicaremos a un 80 %. Trazaremos el punto en la pantalla.

Al obtener la altura de ecos de los restantes agujeros se deben trazar en pantalla sin modificar el nivel de ganancia obtenido a 80 % en el paso anterior. Dibuja en la pantalla la curva que una los puntos obtenidos y trazados anteriormente. Esta curva es la 100% DAC (ver figura 97).

Siguiendo el procedimiento anterior, traza sobre la pantalla una curva que represente una disminución del 50% (6 dB) respecto de la curva 100 % DAC. Esta curva se denomina 50% DAC (ver figura 97).

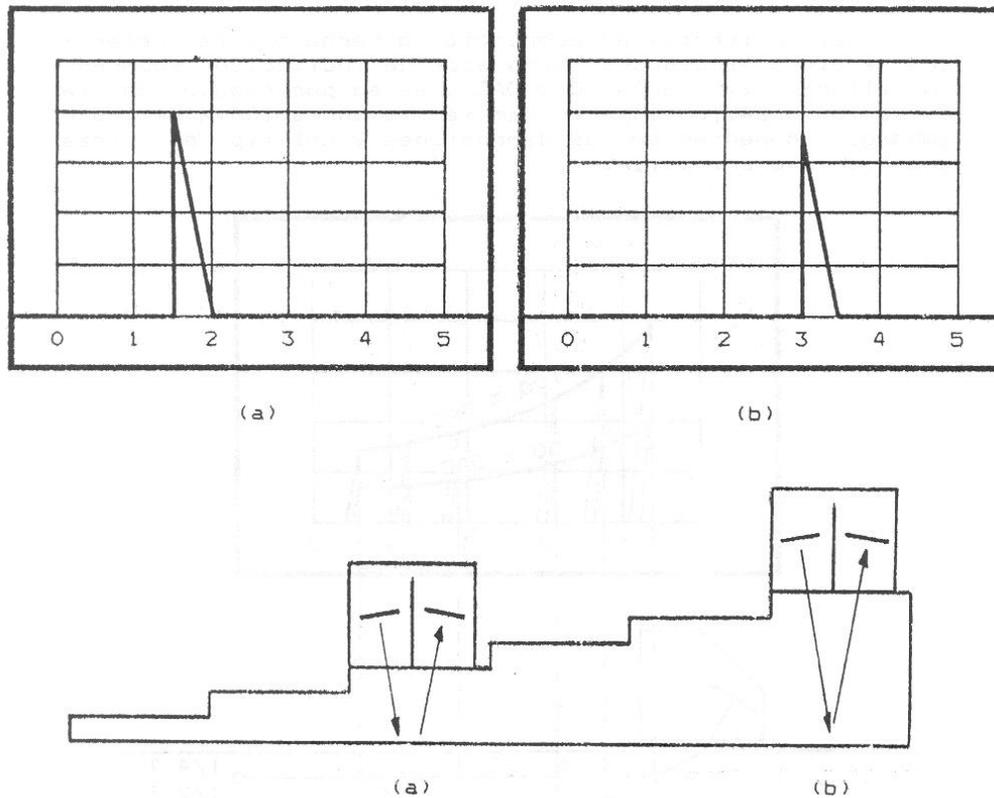


**FIGURA 97.** Realización de las curvas de corrección distancia-amplitud 50 y 100% "DAC".

Los criterios de aceptación o rechazo están referidos a discontinuidades cuyos ecos de indicación superen, en altura, la curva 50 % DAC y estén por debajo de la curva 100 % DAC; o superen también la curva 100 % DAC. Sin embargo, dependen de las dimensiones y del tipo de pieza sometida a inspección.

### 3.11.6. Aplicación del bloque escalonado.

Los palpadores "E-R", cuando son utilizados con equipos de presentación A-scan, son calibrados utilizando patrones que presenten, como mínimo, dos espesores diferentes entre los cuales se encontrará el rango de espesores a medir (ver figura 89). Sin embargo, se encuentran en el mercado patrones de calibración escalonados, los cuales presentan escalones con diversas medidas destinados a la calibración (ver figura 98).



**FIGURA 98.** Calibración de palpadores “E-R” para medición de espesores.

La calibración de palpadores “E-R” para medición de espesores se realiza de la siguiente forma:

1. Seleccionar el rango de distancia-profundidad a medir (en la figura 98, el rango seleccionado es de 10 milímetros).
2. Colóquese el palpador en la posición "(a)" (3 milímetros) y ubíquese el eco en la posición deseada.
3. Colóquese el palpador en la posición "(b)" (6 milímetros) y ubíquese el eco en su posición en pantalla.
4. Los pasos (2 y 3) deben ser efectuados cuantas veces sea necesario hasta que ambos ecos estén en su posición correspondiente. En este momento, el sistema equipo-palpador estará listo para medir con precisión espesores dentro del rango seleccionado (3 a 6 mm).

## 4. MÉTODOS BÁSICOS DE ENSAYOS.

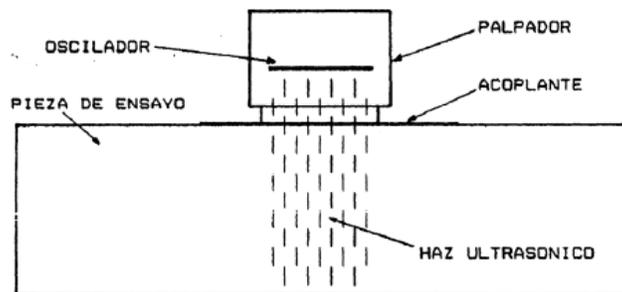
### 4.1 Contacto directo.

El método por contacto directo se basa en que el palpador y la pieza de ensayo se encuentran, como su mismo nombre lo indica, en contacto directo. Siempre, en la interfase entre el palpador y la superficie de la pieza se coloca algún material *acoplante* para garantizar la buena transmisión de la onda ultrasónica. Este método puede ser efectuado mediante tres técnicas que son:

- Técnica de haz normal.
- Técnica de haz angular.
- Técnica de haz superficial.

#### 4.1.1. Técnica de haz normal.

En la técnica de haz normal la incidencia del haz ultrasónico es perpendicular a la superficie límite, o interfase palpador - superficie de ensayo. El tipo de onda transmitida (en las aplicaciones de ésta técnica), es del modo de onda longitudinal o de compresión.



**FIGURA 99.** Técnica de haz normal.

En la figura 99 se muestra un ejemplo típico de un ensayo ultrasónico utilizando la técnica de haz normal. El recorrido del haz, en éste caso, es en la dirección del espesor de la pieza, o sea, forma un ángulo de 90° con respecto al plano superficial; sin embargo, el ángulo de incidencia es igual a 0°.

Los palpadores utilizados en el ensayo mostrado en la figura 99, pueden ser de cristal único o emisor-receptor.

La velocidad de propagación de las ondas longitudinales puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

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

Sin embargo, en la tabla 1 presenta valores de impedancia acústica, velocidad transversal, velocidad longitudinal.

#### 4.1.2. Técnica de haz angular.

En la técnica de haz angular la incidencia del haz, o el ángulo de incidencia del haz ultrasónico, está determinado por el ángulo de refracción del mismo en el material.

En la superficie límite palpador-superficie de ensayo ocurre lo que se define como "modos de conversión", por lo que el valor del ángulo de refracción está determinado por los valores de los ángulos críticos; o sea, será mayor que el primer ángulo crítico y menor que el segundo, con el fin de transmitir, en el material bajo ensayo, únicamente ondas transversales o de cizalladura, así:

$$\alpha_{C1} < \alpha_i < \alpha_{C2}$$

Donde;

$\alpha_i$  = Ángulo de incidencia.

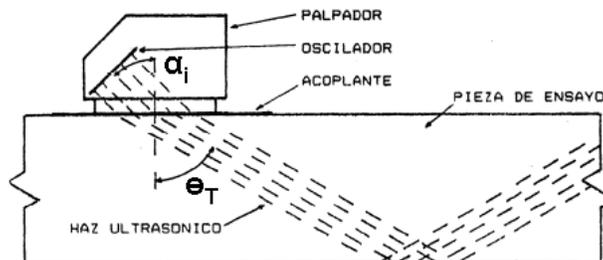
$\alpha_{C1}$  = Primer ángulo crítico.

$\alpha_{C2}$  = Segundo ángulo crítico.

Si tanto el ángulo de incidencia como las velocidades (longitudinal para el material de la zapata y transversal para el material de la pieza bajo ensayo), son conocidos, se podrá calcular el ángulo de refracción del haz ultrasónico en la pieza de ensayo.

Este cálculo se realiza mediante la **Ley de Snell**.

$$\frac{\text{Sen} \alpha_i}{V_{L1}} = \frac{\text{Sen} \theta_T}{V_{T2}}$$



**FIGURA 100.** Técnica de haz angular.

El palpador utilizado en el ensayo mostrado en la figura 100, es un palpador de haz angular.

Los palpadores angulares disponibles en el mercado, están identificados según su frecuencia de excitación, material de fabricación del cristal piezoeléctrico, características dimensionales y ángulo de refracción en acero; sin embargo, mediante la utilización de la ecuación de la **Ley de Snell**, podemos conocer tanto el ángulo de incidencia, propio del palpador, como el ángulo de refracción para cualquier otro material.

En la figura 101 se muestra la relación existente entre los ángulos de incidencia y refracción, para ondas longitudinales y transversales, en un ensayo por el método de contacto directo en una pieza de acero (interfase plástico-acero).



**FIGURA 101.** Relación entre los ángulos de incidencia y refracción para ondas longitudinales y transversales en una interfase plástico-acero.

La velocidad de propagación de las ondas transversales puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

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

puede resumirse en:

$$V_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Sin embargo, en la tabla 1 se presentan valores de densidad, impedancia acústica, velocidad longitudinal, velocidad transversal de diversos materiales.

### 4.1.3. Técnica de haz superficial.

En la técnica de haz superficial, el ángulo de incidencia es ligeramente mayor que el segundo ángulo crítico, por lo que las ondas transversales o de corte se convertirán en ondas superficiales o de Rayleigh, y viajarán a lo largo de la superficie de la pieza de ensayo. Las ondas de superficie, penetran el material bajo ensayo una profundidad equivalente a una longitud de onda (ver figura 102).

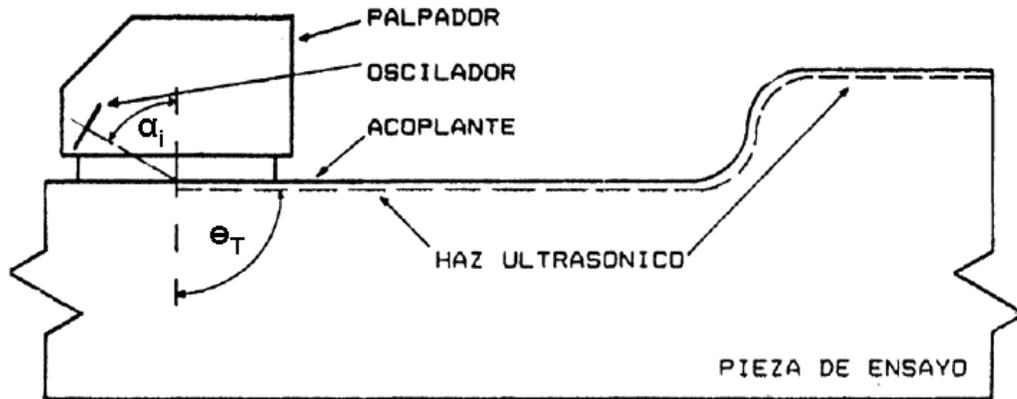


FIGURA 102. Técnica de haz superficial.

Debido a que las ondas superficiales penetran el material solamente una longitud de onda, su aplicación está limitada a la detección de discontinuidades ubicadas en la superficie, o cercanas a ella. Sin embargo, la rugosidad superficial puede crear señales que interfieran con las ondas o, inclusive, impidan su transmisión. El mismo efecto puede tener el medio acoplante, por lo que se debe ser cuidadoso al momento de ser aplicado.

Al igual que con las ondas transversales, los ángulos de incidencia y refracción son calculados mediante la ecuación de la **Ley de Snell**, conociendo previamente las velocidades tanto longitudinal de la zapata del palpador como la superficial del material bajo ensayo, así:

$$\frac{\text{Sen}\alpha_i}{V_{L1}} = \frac{\text{Sen}\theta_T}{V_{T2}}$$

La velocidad acústica de las ondas de superficie puede ser calculada mediante la ecuación expresada:

$$V_S = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)}}$$

Sin embargo, en la tabla 1 se presentan valores de densidad, impedancia acústica, velocidad longitudinal, velocidad transversal de diversos materiales.

#### **4.1.4. Ventajas del método de contacto directo.**

Una de las principales ventajas del ensayo por el método de contacto directo es la flexibilidad en la ubicación del equipo, lo que se traduce en portabilidad. Otras ventajas del método de contacto directo son:

- El requerimiento mínimo de accesorios de instrumentación.
- La posibilidad de usar ondas superficiales.
- Gran poder de penetración.
- La posibilidad de ensayar piezas de gran tamaño.

#### **4.1.5. Limitaciones del método de contacto directo.**

La principal limitación que presenta el método de contacto directo es que la superficie de contacto palpador - pieza de ensayo debe ser uniforme, con el fin de poder mantener un buen contacto acústico entre ambos. Otras limitaciones que presenta éste método son:

- La dificultad que se presenta de mantener un acoplamiento uniforme entre el palpador y la superficie de ensayo, contribuye con pérdidas de la sensibilidad del sistema y la no uniformidad de los resultados.
- El uso de acoplantes pesados y de difícil remoción.
- La presencia de las zonas muerta y de campo cercano, que limita la detección de discontinuidades cercanas a la superficie.
- El uso de gran variedad de palpadores debido a la gama de ángulos aplicables en el ensayo.
- El método de contacto directo no puede ser adaptado a sistemas automáticos.

#### **4.2. Inmersión.**

El ensayo por el método de inmersión contempla la aplicación de técnicas, al igual que el método por contacto directo, en lo que respecta a:

- Técnica de haz normal.
- Técnica de haz angular.

Tanto la técnica de haz superficial como la de onda de chapa (onda de Lamb), no son posibles de ser efectuadas con el método de inmersión pues, siendo posible crear las ondas desde la superficie del palpador, su transmisión se anula por efecto de la baja resistencia que presenta el material acoplante a las ondas de corte o cizalladura.

#### 4.2.1. Técnica de haz normal.

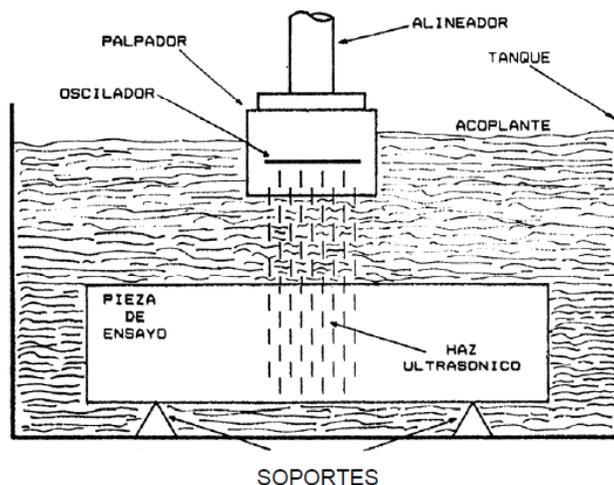
La aplicación de la técnica de haz normal en el ensayo por el método de inmersión es similar a su aplicación en el método por contacto directo, la incidencia del haz ultrasónico es perpendicular a las superficies límites, palpador – acoplante y acoplante - pieza de ensayo. El tipo de onda transmitida es del modo de onda longitudinal o de compresión.

La diferencia básica entre ambas técnicas, es que en inmersión, la distancia entre las superficies del palpador y de la pieza de ensayo es considerablemente mayor, esto permite que las zonas muerta y de campo cercano (características del haz ultrasónico), se propaguen en el agua, o en cualquier otro elemento acoplante, y sea mucho más factible la detección de discontinuidades cercanas a la superficie superior de la pieza de ensayo.

La velocidad acústica de propagación de las ondas longitudinales, puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

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

Sin embargo, en la tabla I se presentan valores de densidad, impedancia acústica, velocidad longitudinal, velocidad transversal de diversos materiales.



**FIGURA 103.** Técnica de haz normal.

Este ejemplo, dentro de la técnica de haz normal para ensayos por el método de inmersión, abarca la aplicación de todos los sistemas de ensayo, no obstante que éstos difieren entre sí, el principio de ensayo es el mismo, de inmersión.

#### 4.2.2. Técnica de haz angular.

En el ensayo por el método de inmersión utilizando la técnica de haz angular, el palpador se encuentra sumergido en un medio acoplante con el cual la transmisión de la onda ultrasónica longitudinal se realiza perpendicular a la interfase palpador- agua; sin embargo, la incidencia del haz ultrasónico, en la superficie de la pieza de ensayo, es oblicua, o sea, forma un ángulo con la perpendicular al plano de interfase agua-pieza de ensayo. El valor de éste ángulo está determinado, al igual que en el caso de contacto directo, por los ángulos críticos cumpliendo la relación que dice:

$$\alpha_{C1} < \alpha_i < \alpha_{C2}$$

Donde;

$\alpha_i$  = Ángulo de incidencia.

$\alpha_{C1}$  = Primer ángulo crítico.

$\alpha_{C2}$  = Segundo ángulo crítico.



**FIGURA 104.** Relación entre los ángulos de incidencia y refracción para una interfase agua-acero.

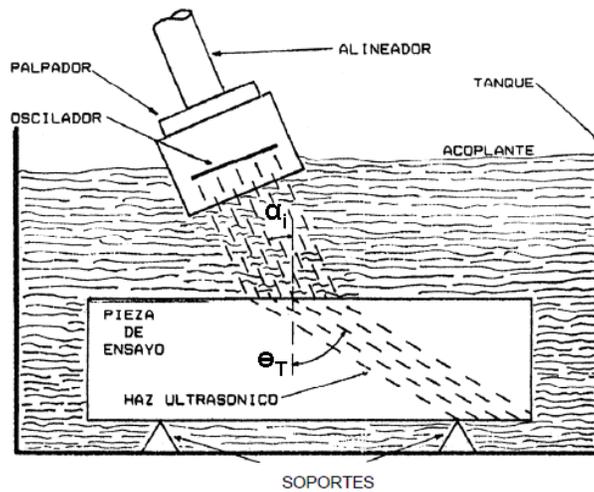
En la figura 104 se muestra la relación existente entre los ángulos de incidencia y refracción, para ondas longitudinales y transversales, en una interfase agua- acero. En la velocidad de propagación de las ondas transversales, puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

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

puede resumirse en:

$$V_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Sin embargo, en la tabla 1 se presentan valores de densidad, impedancia acústica, velocidad longitudinal, velocidad transversal de diversos materiales.



**FIGURA 105.** Técnica de haz angular.

En la figura 105 se muestra un ejemplo donde, el ángulo de incidencia en agua está calculado para un ángulo de refracción en incidencia para acero de 45°, puede ser efectuado el cálculo mediante la ecuación:

$$\frac{\text{Sen} \alpha_i}{V_{L1}} = \frac{\text{Sen} \theta_T}{V_{T2}}$$

En el ensayo por el método de inmersión, la gama de palpadores disminuye, pues un mismo palpador puede ser usado tanto en la técnica de haz normal como en la de haz angular. Manipulando el sistema de ensayo puede fijarse el ángulo deseado para una incidencia angular.

#### 4.2.3. Ventajas del método de inmersión.

Las principales ventajas del método de inmersión son:

- El uso de frecuencias de ensayo sumamente altas, lo que permite; detección de efectos muy pequeños y altas velocidades de ensayo.
- La angulación del palpador se hace muy fácilmente.
- Se posibilita el estudio de piezas con irregularidades superficiales.
- Buena resolución superficial.

#### 4.2.4. Limitaciones del método de inmersión.

El método de ensayo por inmersión presenta también ciertas limitaciones o desventajas que son:

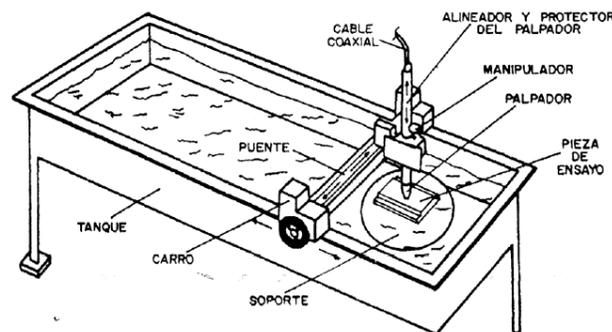
- El gran número de accesorios que son requeridos.
- En la interfase agua-pieza de ensayo, se refleja gran cantidad de la energía ultrasónica, por efecto de la diferencia notable entre las impedancias acústicas de ambos medios, lo que reduce la amplitud de la señal de indicación.
- Debido a las dimensiones del tanque se imposibilita el ensayo a piezas de gran tamaño.

Los ensayos ultrasónicos por el método de inmersión son efectuados, por lo general, con sistemas automáticos, aunque pueden ser realizados mediante sistemas semiautomáticos. En fin, los sistemas de ensayo por inmersión, comúnmente utilizados son:

- Sistema de inmersión en tanque.
- Sistema de chorro de agua.
- Sistema de rueda.

#### 4.2.5. Sistema de inmersión en tanque.

En el sistema de inmersión en tanque, tanto el objeto a ensayar como el palpador están sumergidos en un tanque con material acoplante, este puede ser agua con algún agente humectante, el acoplante actúa como elemento transmisor (ver figura 106).



**FIGURA 106.** Método de ensayo por inmersión en el sistema de inmersión en tanque.

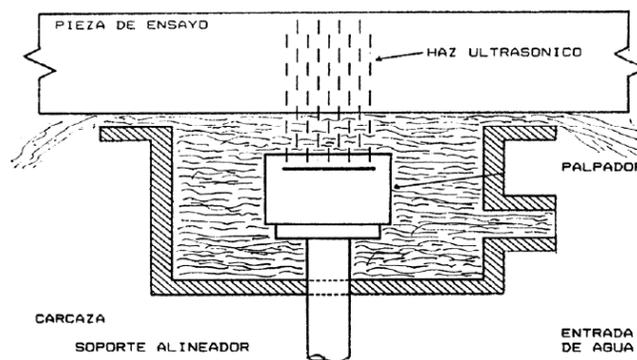
En el sistema de ensayo por inmersión en tanque mostrado en la figura 106 se pueden observar ciertos componentes característicos que son básicos, entre ellos se pueden mencionar:

- **Alineador y protector:** Con capacidad de desplazamiento vertical para proporcionar al palpador la ubicación exacta según la calibración del sistema de medición.
- **Manipulador:** Con libertad para el movimiento transversal al eje del tanque, puede ser adaptado a sistemas automáticos.
- **Carro:** Con desplazamiento en sentido longitudinal al eje del tanque, al igual que el manipulador también puede ser adaptado a sistemas automáticos.
- **Puente:** Sirve de apoyo al manipulador, de forma que en los desplazamientos no se pierda la graduación proporcionada mediante el alineador al palpador.
- **Soporte:** Para asegurar que la pieza de ensayo mantenga su posición.
- **Tanque:** Para proporcionar la suficiente estanqueidad al agente acoplante entre el palpador y la pieza de ensayo.

El cable coaxial va conectada al sistema ultrasónico de medición que con ayuda de otros sistemas anexos controla la automatización del sistema de ensayo por inmersión en tanque.

#### 4.2.6. Sistema de chorro de agua.

Otra forma de ensayo por el método de inmersión es el sistema de chorro de agua, en éste sistema el haz ultrasónico se propaga a través de una columna de agua que fluye constantemente como medio acoplante para hacer el contacto con la superficie de la pieza. Al igual que en el sistema de inmersión en tanque, el agua se mezcla con aditivos, cuyo objetivo es eliminar la formación de burbujas que puedan ocasionar interferencias en la transmisión del haz ultrasónico (ver figura 107).



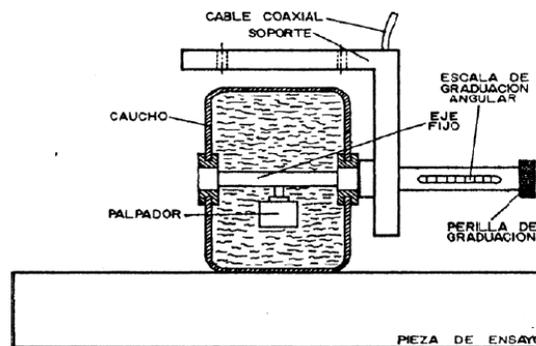
**FIGURA 107.** Sistema de chorro de agua.

El sistema de chorro de agua es utilizado en montajes automáticos de alta velocidad de ensayo. En éste sistema, se desplazan tanto el palpador (con sus accesorios) sobre la superficie de la pieza, como la misma pieza de ensayo. El palpador utilizado es, generalmente, focalizado mediante zapatas especiales

con el fin de concentrar el haz ultrasónico y evitar la dispersión del mismo. El agua, que actúa como agente acoplante, fluye constantemente de forma que elimina los vacíos existentes entre el palpador y la pieza de otra forma, los vacíos (volúmenes de aire) interrumpirían la transmisión del ultrasonido.

#### 4.2.7. Sistema de rueda.

El sistema de rueda es un tipo de ensayo por inmersión donde el haz ultrasónico es proyectado a través del agua que se encuentra encerrada por una tripa de caucho delgada. El palpador está fijado al eje de la rueda, mientras que ésta gira libremente. El sistema de rueda puede ser móvil, donde el equipo se desplazará sobre una pieza estacionaria, o puede ser fijo, la pieza de ensayo se desplazará hasta ser cubierta por el sistema (ver figura 108).



**FIGURA 108.** Sistema de rueda.

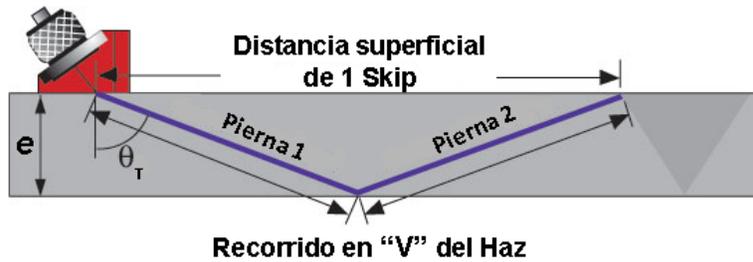
El sistema mostrado en la figura 108 es utilizado en ensayos de alta velocidad, en piezas con grandes contornos superficiales. Una de las limitaciones del ensayo con el sistema de rueda, es que las condiciones y la calidad de la superficie de la pieza de ensayo deben ser buenas, pues de otra forma, el contacto entre el caucho y la superficie no sería total y habría pérdidas en la transmisión del haz. Generalmente, entre el caucho y la superficie de la pieza de ensayo se coloca aceite para evitar burbujas de aire que puedan interferir con la transmisión adecuada del sonido.

Este sistema de ensayo es considerado una mezcla de los dos métodos conocidos. Contacto directo e inmersión; esto se debe a que las condiciones de acople, entre la tripa de caucho y la pieza de ensayo, son similares a las condiciones del ensayo por contacto directo; por otra parte, el palpador se encuentra sumergido en agua, lo que le da características de sistema de ensayo por el método de inmersión.

Los sistemas de ensayo por el método de inmersión son utilizados comúnmente en chequeos de producción en serie, donde los ensayos son llevados a cabo automáticamente.

## 5. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS.

### 5.1. Cálculo de la distancia superficial y recorrido del haz angular en superficies planas.



$\theta_T$  = Ángulo de refracción de la onda transversal.

$e$  = Espesor del material.

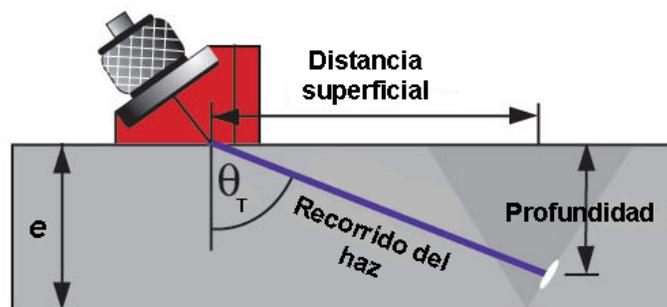
Distancia superficial de 1 Skip =  $2e \times \tan \theta_T$

$$Pierna = \frac{e}{\cos \theta_T}$$

$$\text{Recorrido en "V" del Haz} = \frac{2e}{\cos \theta_T}$$

FIGURA 109. Distancia superficial y recorrido del haz ultrasónico.

### 5.2. Cálculo de profundidad del defecto.



$\theta_T$  = Ángulo de refracción de la onda transversal.

$e$  = Espesor del material.

Distancia superficial =  $\text{Sen } \theta_T \times \text{Recorrido del Haz}$

Profundidad =  $\text{Cos } \theta_T \times \text{Recorrido del Haz}$

FIGURA 110. Distancia superficial, recorrido del haz ultrasónico y profundidad del defecto.

5.3. Aplicación de la técnica del haz angular en superficies curvas por el método de contacto directo e inmersión.

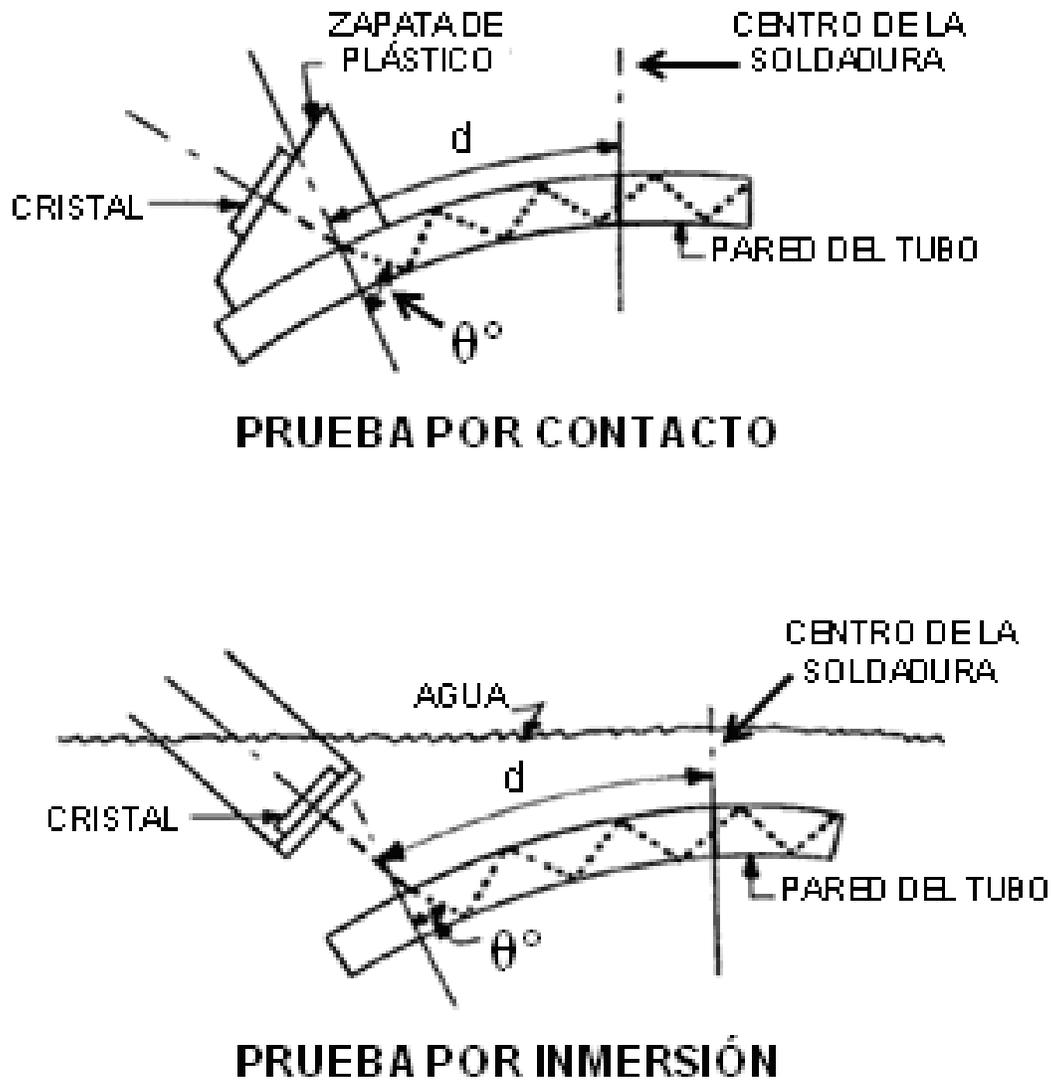
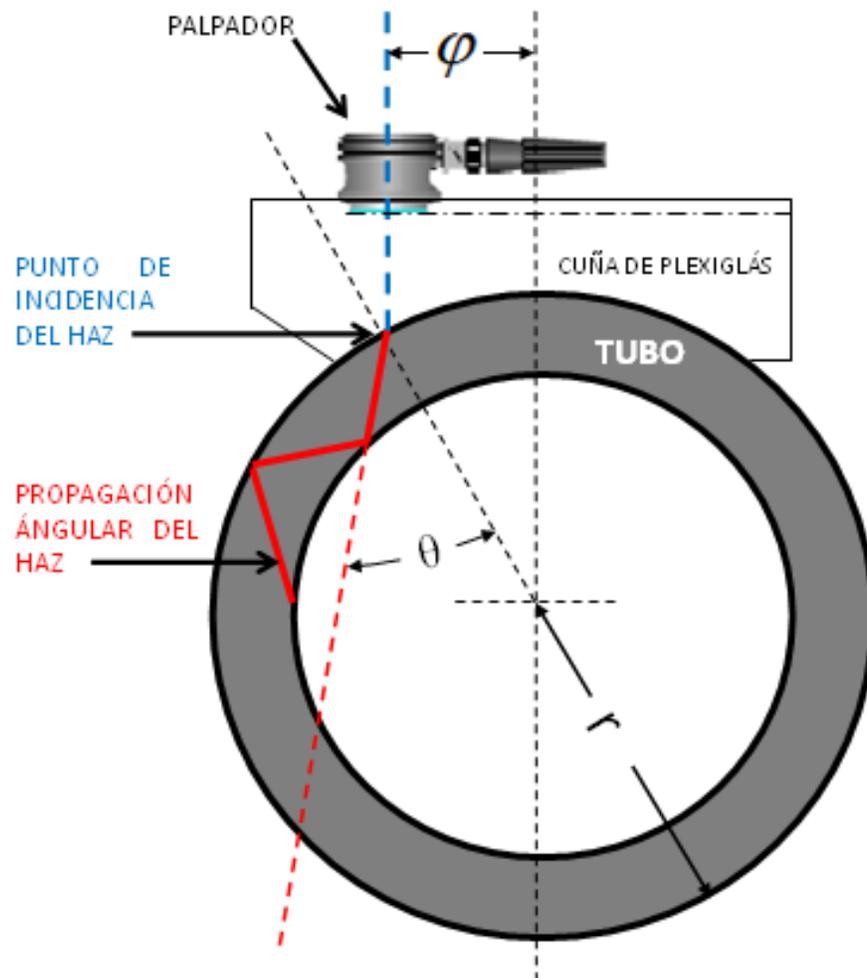


FIGURA 111. Ángulo de proyección de la onda ultrasónica.





**FIGURA 113.** Determinación de la distancia de excentricidad (OFFSET).

$$\varphi = r \times \frac{V_1}{V_2} \times \text{sen} \theta$$

$\varphi$  = Distancia de Excentricidad

$r$  = Radio del tubo.

$V_1$  = Velocidad acústica (Cuña).

$V_2$  = Velocidad acústica (Acero).

$\theta$  = Ángulo de refracción deseado.

5.5. Aplicación del método de inmersión en superficies curvas.

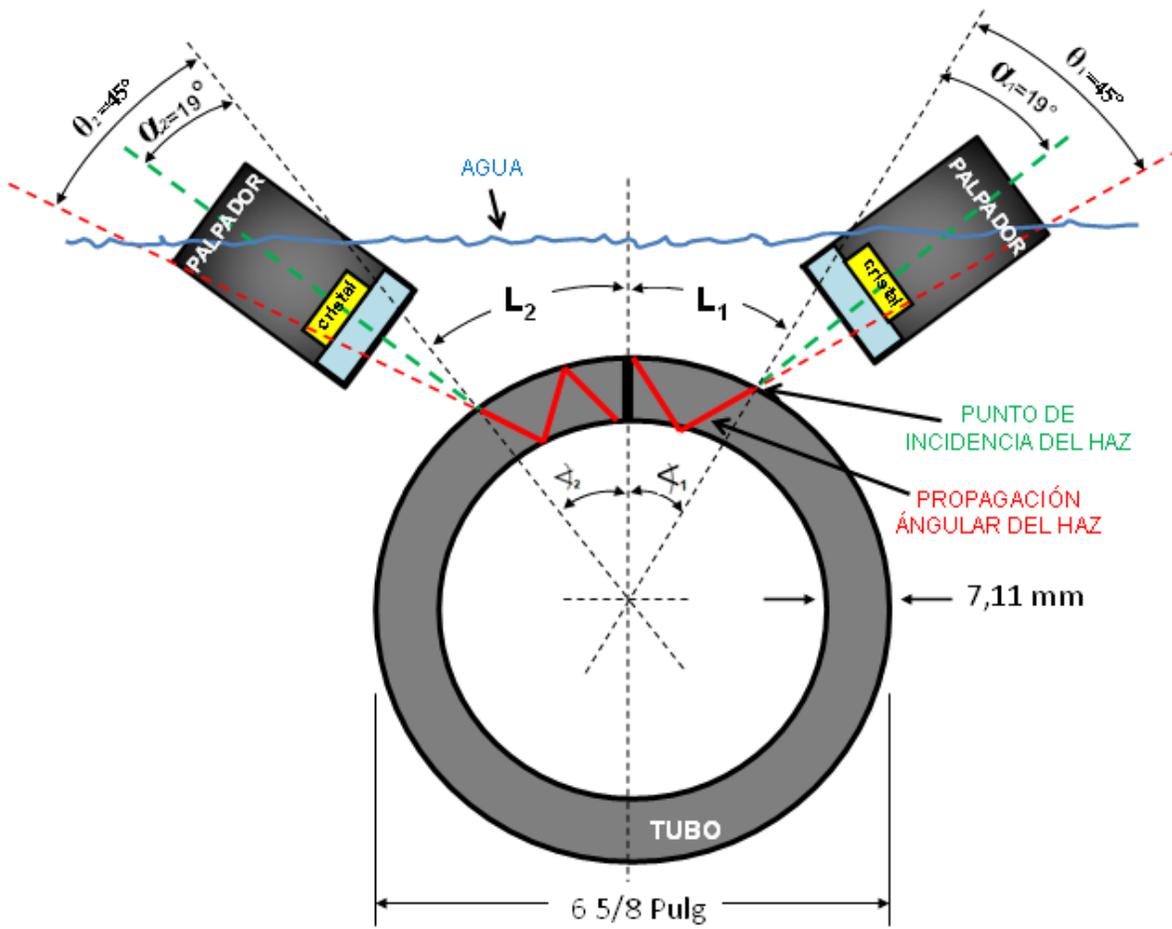


FIGURA 114. Determinación de la distancia de excentricidad (OFFSET).

- |  |                                    |
|--|------------------------------------|
| $L$ = Distancia superficial.                                     | $\varnothing = 6 \frac{5}{8}$ Pulg |
| $\alpha$ = Ángulo de incidencia.                                 | $e = 7,11$ mm                      |
| $\theta$ = Ángulo de refracción.                                 | $r = 84,14$ mm                     |
| $f_s = 1,18$ = Distancia superficial de 1 skip para $45^\circ$ . | $L_1 = 16,77$ mm                   |
|  | $\Delta_1 = 11,27^\circ$           |
|  | $L_2 = 25,16$ mm                   |
|  | $\Delta_2 = 16,64^\circ$           |

## GLOSARIO DE TÉRMINOS.

**Amplitud (A):** Es la máxima desviación del cuerpo oscilante desde la posición de equilibrio.

**Atenuación:** Es un efecto que debilita el sonido mientras se propaga más lejos.

**Coefficiente de Poisson ( $\mu$ ):** Es la relación (negativa) entre la deformación perpendicular ( $\epsilon_i$ ) y paralela a la dirección de aplicación del esfuerzo ( $\epsilon_{ii}$ ).

**Densidad ( $\rho$ ):** Constante propia de cada material. Se define por la relación entre la masa ( $m$ ) y el volumen ( $V$ ).

**Difracción:** Es cuando el obstáculo es más grande que la longitud de onda y si la impedancia acústica del obstáculo difiere mucho de sus alrededores se producirá una reflexión de la onda en el mismo. No habrá onda de propagación detrás de él (sombra de la onda), esta sombra será cada vez menor con el incremento de la distancia desde el obstáculo. Como los bordes del obstáculo son algo curvadas (difractadas) y corren oblicuamente hacia el interior de la sombra.

**Dispersión:** Se produce por la no homogeneidad del material bajo ensayo; o sea, la presencia de pequeñas heterogeneidades, que actúan como focos dispersores.

Es cuando el obstáculo es del mismo tamaño que la longitud de la onda el proceso de propagación es débilmente interferido y algo de energía de la onda es absorbida. Esta energía se extenderá como una nueva onda esférica en todas direcciones, con el obstáculo como punto central.

**Frecuencia ( $f$ ):** Es la inversa del periodo o el número de oscilaciones (ciclos) por unidad de tiempo.

**Frecuencia de Resonancia:** Es la frecuencia a la cual el sistema actúa bajo condiciones tales que la interacción entre el agente impulsor y el sistema se ven ampliados a un valor máximo.

**Impedancia acústica (Z):** Es la resistencia que opone un material a la propagación del sonido y está definida como el producto de su densidad ( $\rho$ ) y la velocidad acústica ( $V$ ).

**Longitud de onda ( $\lambda$ ):** Es la distancia ocupada por una onda completa y es igual a la distancia a través de la cual se mueve la onda por un periodo o ciclo.

**Módulo de Corte (G);** Es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo de corte ( $\tau$ ) y la deformación de corte unitaria ( $\gamma$ ) experimentada por el material.

**Módulo de Elasticidad (E);** Es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo de tracción o compresión ( $\sigma$ ) y la deformación unitaria ( $\epsilon$ ) experimentada por el material.

**Ondas de placa o de Lamb:** Son aquellas que se generan cuando un material muy delgado se somete a una onda de superficie.

**Ondas de superficie o de Rayleigh:** Son aquellas que se desplazan sobre la superficie del material y penetran a una profundidad máxima de una longitud de onda, su trayectoria es elíptica.

**Ondas longitudinales o de compresión:** Se caracterizan porque los desplazamientos de las partículas son paralelos a la dirección de propagación del ultrasonido.

**Ondas transversales o de corte:** Es el movimiento de las partículas transversal a la dirección de propagación de las ondas.

**Oscilación (ciclos):** Cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo.

**Palpador (unidad de búsqueda):** Es el arreglo que permite la manipulación del transductor para efectuar el ensayo.

**Período ( $t$ ):** Tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación.

**Piezolectricidad:** Es un fenómeno reversible porque al producir una deformación mecánica en un cristal, se producen cargas eléctricas sobre sus caras (efecto piezoeléctrico directo); por otra parte, si al cristal se le aplica una corriente eléctrica sobre sus caras se producirá una deformación mecánica (efecto piezoeléctrico invertido).

**Reflexión:** Es cuando la onda que incide es perpendicular a la interfase acústica (incidencia normal o angular), se refleja hacia la fuente generadora, en la misma dirección pero con el sentido opuesto.

**Refracción:** Es cuando ocurre en una interfaz debido a las diversas velocidades de las ondas acústicas dentro de los dos materiales.

**Resolución:** El poder de resolución es la habilidad que presenta un palpador para separar o identificar las señales de indicación de varios reflectores diferentes y cercanos, en lo que a profundidad se refiere.

**Sensibilidad:** Es la habilidad para detectar discontinuidades del menor tamaño posible, podemos referirnos, entonces, al "tamaño crítico de un posible defecto".

**Sonido:** Vibración mecánica de partículas en un medio.

**Transductor (elemento activo):** Es aquel elemento que tiene por función transformar energía mecánica (vibraciones) en energía eléctrica o viceversa, que es el caso de los cristales piezoeléctricos.

**Ultrasonido:** Son ondas mecánicas (perturbaciones) de alta frecuencia, que se propagan a través de los materiales y que son reflejadas al encontrar cambios (discontinuidades o interfaces) en las propiedades elásticas de los materiales.

**Velocidad de propagación o velocidad acústica ( $V$ ):** Es la velocidad de transmisión de la energía sonora a través de un medio en la dirección de propagación.

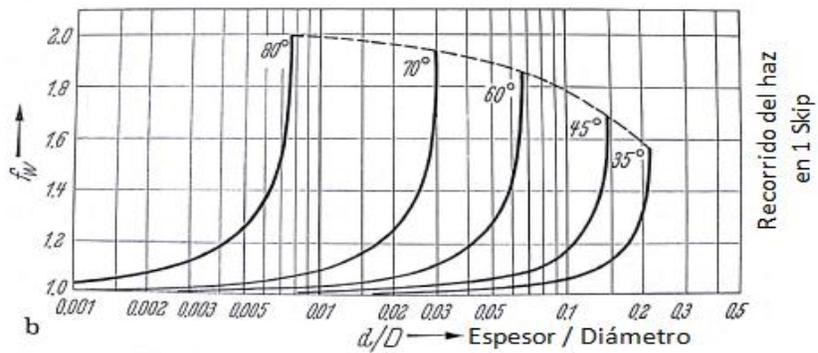
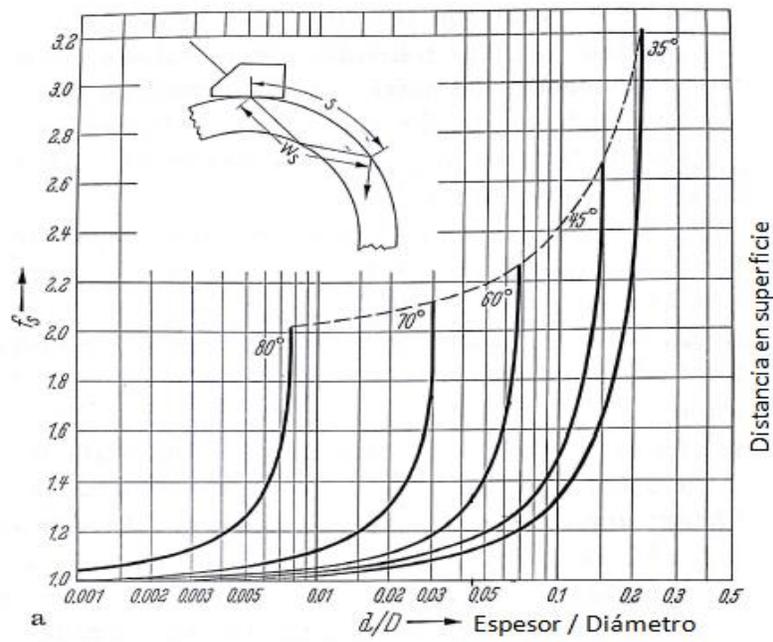
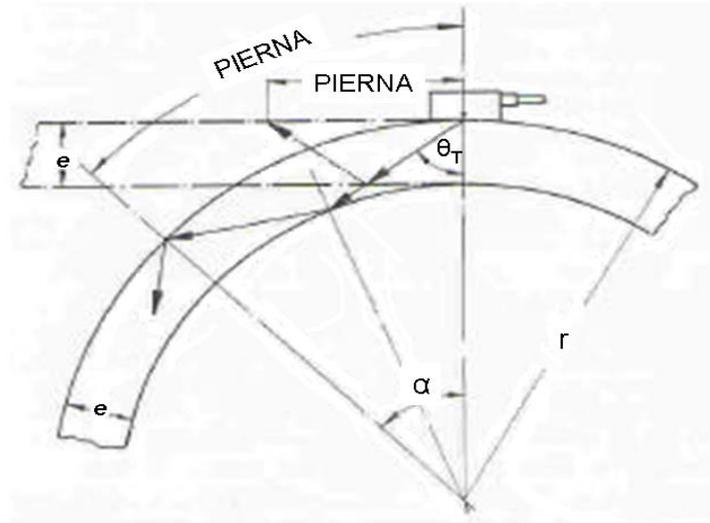
**Zona infrasónica:** Donde el rango de frecuencias es menor a 16 ciclos por segundo ( $f < 16$  Hz).

**Zona sónica:** Donde las frecuencias se encuentran entre 16 y 20.000 ciclos por segundo ( $16 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$ ).

**Zona ultrasónica:** Donde las frecuencias son mayores a 20.000 ciclos por segundo ( $f > 20 \text{ kHz}$ ).

ANEXOS

## FACTOR DE CORRECCIÓN.



Densidades, Velocidades e impedancias acústicas de distintos materiales				
Material	Densidad 10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup> $\rho$	Velocidades Acústicas 10 <sup>3</sup> m/s		Impedancia Acústica 10 <sup>6</sup> Kg/m <sup>2</sup> *s $Z = \rho*VL$
		VL	Vt	
Acero (baja aleación)	7.85	5.83	3.19	45.7
Acero Inoxidable austenítico (18/B)	8.03	5.66	3.12	45.5
Acero Inoxidable martensítico 13% Cr	7.67	7.39	2.99	56.7
Aluminio	2.71	6.32	3.08	17.1
Aleación Al - Cu Al L 3120	2.78	6.25	3.10	17.4
Aleación Al - Cu Al L 3140	2.78	6.19	3.11	17.2
Fundición (hierro-carbón)	7.2	3.5-5.6	2.2-3.2	25-40
Hierro	7.7	5.85	3.23	45
Inconel (laminado)	8.25	7.82	3.02	64.5
Latón (Cu-Zn)	8.6	3.83	2.05	33
Metal duro (Widia)	11-15	6.8-7.3	4.0-4.7	75-110
Monel (laminado)	8.83	6.02	2.72	53.1
Níquel	8.9	5.63	2.96	50
Plomo 6% Antimonio	10.9	2.16	0.81	23.6
Cristales Piezoeléctricos				
Cuarzo (SiO <sub>2</sub> ) Corte X	2.65	5.76	---	15.3
Metaniobato de Plomo (PbNb <sub>2</sub> O)	5.8	2.8	---	16
Sulfato de Litio (Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	2.06	4.72	---	8.6
Titanato de Bario (BaTiO <sub>3</sub> )	5.7	4.40	---	11.2
Plexiglás	1.18	2.73	1.1	3.1
Teflón	2.2	1.35	---	3.0
Araldit	1.15-1.3	2.5-2.8	1.1	2.8-3.7
Baquelita	1.4	2.59	---	3.6
Aceite (SAE 20 a 30)	0.89-0.96	1.74	---	1.5-1.7
Agua Destilada	1.0	1.483	---	1.48
Glicerina	1.26	1.92	---	2.4
Alcohol etílico	0.79	1.17	---	0.92
Aire	0.0012	0.330	---	0.000398

## FORMULARIO.

**Frecuencia.**

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

**Longitud de onda.**

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

**Zona de Fresnel.**

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 \cdot f}{4V}$$

**Ángulo de divergencia.**

$$\text{Sen} \alpha = 1,2 \frac{\lambda}{d} = 1,2 \frac{V}{f \cdot d}$$

**La atenuación.**

$$\Delta db = 20 \times \log \frac{A_2}{A_1} \quad A = A_o \cdot e^{-\alpha z}$$

**Impedancia acústica.**

$$Z = \rho \cdot V$$

**Energía transmitida y reflejada.**

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

**Coefficientes de reflexión y transmisión.**

$$R + T = 1$$

**Ley de Snell.**

$$\frac{\text{Sen} \alpha}{V_1} = \frac{\text{Sen} \theta}{V_2} \longrightarrow \frac{\text{Sen} \alpha}{\text{Sen} \theta} = \frac{V_1}{V_2}$$

**Primer ángulo crítico.**

$$\frac{\text{Sen} \alpha_1}{V_{L1}} = \frac{\text{Sen} \theta_L}{V_{L2}}$$

**Segundo ángulo crítico.**

$$\frac{\text{Sen} \alpha_2}{V_{L1}} = \frac{\text{Sen} \theta_T}{V_{T2}}$$

**Intervalo de reloj.**

$$C.I. = \frac{1}{p.p.s.}$$

**Distancia superficial.**

$$\text{Dist. Sup} = \text{Sen} \theta_T \cdot R \cdot \text{Haz}$$

**Pierna.**

$$\text{Pierna} = \frac{e}{\text{Cos} \theta_T}$$

**Recorrido en V del haz.**

$$R.V = \frac{2 \cdot e}{\text{Cos} \theta_T}$$

**Distancia de excentricidad (OFFSET).**

$$\varphi = r \cdot \frac{V_1}{V_2} \text{Sen} \theta_T$$

## **Características de los materiales piezoeléctricos más usados como elemento activo en los palpadores de ultrasonido**

<b>Material</b>	<b>Eficiencia como Transmisor</b>	<b>Eficiencia como Receptor</b>	<b>Sensibilidad</b>	<b>Poder de Resolución</b>	<b>Características Mecánicas</b>
Cuarzo	mala	mediana	escasa	óptimo	buena
Sulfato de Litio	mediana	buena	buena	óptimo	Soluble en agua
Titanato de Bario	buena	mediana	óptima	mediano	frágil
Metaniobato de Plomo	buena	mediana	óptima	óptimo	buena
Zirconato Titanato	buena	mediana	óptima	mediano	Buena

**UNIDADES DE TIEMPO.**

1 Nanosegundo (1ns)	$10^{-9}$ s
1 Microsegundo (1 $\mu$ s)	$10^{-6}$ s
1 Milisegundo (1 ms)	$10^{-3}$ s
1 Minuto (1 min)	60 s
1 Hora (1 h)	3.600 s
1 Día (1 d)	86.400 s

**UNIDADES DE LONGITUD.**

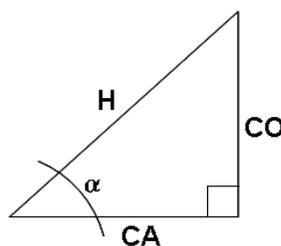
1 Nanómetro (1nm)	$10^{-9}$ m
1 Micrometro (1 $\mu$ m)	$10^{-6}$ m
1 Milímetro (1 mm)	$10^{-3}$ m
1 Centímetro (1 cm)	$10^{-2}$ m
1 Kilómetro (1 Km)	1.000 m
1 Metro(1 m)	100 cm
1 Centímetro (1 cm)	10 mm
1 Pulgada (1 pulg)	2,54 cm
1 Pulgada (1 pulg)	25,.4 mm

**UNIDADES DE FRECUENCIA.**

1 Herz (1Hz)	1 ciclo por segundo	
1 Kiloherz (1KHz)	$10^3$ Hz	1.000 ciclos por segundo
1 Megahertz (1 MHz)	$10^6$ Hz	1.000.000 ciclos por segundo
1Gigahertz (1 GHz)	$10^9$ Hz	1.000.000.000 ciclos por segundo

**UNIDADES ANGULARES.**

	0°	30°	45°	60°	90°
<b>Sen <math>\alpha</math></b>	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1
<b>Cos <math>\alpha</math></b>	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
<b>Tag <math>\alpha</math></b>	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1	$\sqrt{3}$	$\pm\infty$



$$\text{Sen}\alpha = \frac{CO}{H}$$

$$\text{Cos}\alpha = \frac{CA}{H}$$

$$\text{Tag}\alpha = \frac{CO}{CA}$$