

**DESARROLLO Y PROCEDIMIENTOS PARA LA UTILIZACIÓN DE
TÉCNICAS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS CON ULTRASONIDO PARA
INSPECCIÓN DE TUBERÍAS**

**LIZETH PAOLA BARRERA SUÁREZ
MARTHA MARCELA CORONEL PICÓN**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRONICA
BUCARAMANGA
2011**

**DESARROLLO Y PROCEDIMIENTOS PARA LA UTILIZACIÓN DE
TÉCNICAS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS CON ULTRASONIDO PARA
INSPECCIÓN DE TUBERÍAS**

**LIZETH PAOLA BARRERA SUÁREZ
MARTHA MARCELA CORONEL PICÓN**

**Monografía para optar al título de
Especialista en Control e Instrumentación Industrial**

**Director
Raquel Díaz Ramírez
Esp. En Control e Instrumentación Industrial**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRONICA
BUCARAMANGA
2011**

A Dios y a la Virgen, por esta oportunidad.

A mis padres, por estar siempre allí cuando los necesito.

A mi hermano por la idea del proyecto y su asesoría.

A Marce, compañera de monografía y de traspaso,

A mis amigos de la especialización, por la compañía y los buenos momentos durante este camino.

Lizeth Paola Barrera Suárez

A Dios por guiarme, por darme fortaleza y por brindarme la oportunidad de alcanzar éste logro.

*A mis padres:
Elba, por ser incondicional conmigo, por tu gran amor, confianza, total entrega, y por ser mi gran amiga y confidente. Ramiro, por tu gran amor y valioso apoyo. Mi abuela Lucía, por consentirme tanto y por todas sus oraciones en cada momento.*

A mi hermana Rossio, por su apoyo, por contagiarme de su buena energía y por ser mi mayor ejemplo e impulsadora para alcanzar todo lo que deseo. A mi niña María Fernanda, por su amor y por ser mi calma en los momentos difíciles.

A mi abuela Nohemí y a mis hermanas Ibeth y Andrea por todo su amor y apoyo.

A mi cuñado Bladimir, por todo su apoyo y cariño, y por darme una luz en el camino que me llevó a alcanzar éste triunfo.

A mi compañera Lizeth, por todo su apoyo y colaboración durante todo éste tiempo.

A mi amiga Lidia por apoyarme tanto y por ser mi amiga y confidente. Y a todos mis compañeros de especialización por su ayuda y por todos los buenos momentos que compartimos.

A mis primos, primas, tías, tíos, y a toda mi familia por su buena energía que me impulsó en cada momento de esta etapa.

Y a Gerson Barrera por su apoyo, valiosa colaboración, y por todos sus chistes.

AGRADECIMIENTOS

A la ingeniera Raquel Díaz Ramírez quien por su dedicación y asesoría hizo posible la elaboración y entrega oportuna de este proyecto.

A los ingenieros Raúl Restrepo y Juan Carlos Mantilla por su apoyo para obtener resultados satisfactorios en el tiempo estipulado.

Agradecemos a la facultad de ingeniería electrónica de la UPB , especialmente a los docentes de la especialización en control e instrumentación industrial por sus enseñanzas y aportes.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.	2
1.1 INSPECCIÓN VISUAL	2
1.2 RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL	3
1.3 CORRIENTES INDUCIDAS	3
1.4 ULTRASONIDO.....	3
1.5 LÍQUIDOS PENETRANTES	4
1.6 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	4
1.7 GUÍA PARA LA SELECCIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)	4
2. FUNDAMENTOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS CON ULTRASONIDO.....	7
2.1 ¿QUÉ ES EL ULTRASONIDO?	7
2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ULTRASONIDO	7
2.3 GENERALIDADES DE LOS MÉTODOS Y TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ULTRASONIDO	8
2.3.1 Ensayo Ultrasónico Por Pulso-Eco	11
2.3.2 Ensayo Ultrasónico Por Transmisión	11
2.3.3 Ensayo Ultrasónico Por Resonancia	12
2.3.4 Ensayo Ultrasónico Por Contacto	12
2.3.5 Ensayo Ultrasónico Por Inmersión.....	13
2.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS ULTRASONICAS.....	13
2.4.1 Amplitud	14
2.4.2 Ciclo	14
2.4.3 Longitud de onda.....	15
2.4.4 Periodo y Frecuencia	15
2.4.5 Velocidad de propagación.....	15
2.4.6 Resolución	16
2.4.7 Sensibilidad	16
2.4.8 Atenuación	17
2.4.9 Frecuencia del transductor	17
2.4.10 Reflexión y transmisión del sonido	17
2.4.11 Impedancia acústica	17
2.4.12 Haz Ultrasónico.....	18

2.4.12.1 Zona Muerta	18
2.4.12.2 Zona Cercana	19
2.4.12.3 zona lejana.....	19
2.5 MODOS DE ONDAS ULTRASÓNICAS	19
2.5.1 Ondas longitudinales	20
2.5.2 Ondas transversales.....	20
2.5.3 Ondas superficiales.	21
2.5.4 Ondas Lamb	22
2.6 PROPAGACIÓN DEL HAZ ULTRASÓNICO A TRAVES DE DOS MATERIALES	22
2.6.1 Refracción de Interfase y Conversión de Modo	23
2.6.1.1 Ley de Snell y ángulos críticos:	24
3. EQUIPO ULTRASÓNICO.....	26
3.1 CIRCUITOS DEL EQUIPO ULTRASÓNICO	26
3.1.1 Circuito de reloj o sincronizador.	26
3.1.2 Circuito transmisor (emisor).	27
3.1.3 Circuito generador de barrido.	27
3.1.4 Circuito receptor.....	27
3.1.5 Tubo de rayos catódicos.....	30
3.2 CONTROLES DEL EQUIPO ULTRASÓNICO ESTANDAR	33
3.3 PALPADORES.....	35
3.3.1 Clasificación del Transductor.....	36
3.3.1.1 Transductor piezoeléctrico.	36
3.3.1.2 Transductor electrostrictivo.	38
3.3.1.3 Transductor EMAT.	39
3.3.1.4 Transductor aéreo.	40
3.3.2 Capacidad o características de un palpador.	40
3.3.2.1 Sensibilidad.....	41
3.3.2.1 Resolución.	41
3.3.3 Tipos de palpadores.	41
3.3.3.1 Palpadores por contacto directo.	41
3.3.3.2 Palpadores de inmersión.....	44
3.3.3.3 Palpadores de escobilla (paintbrush).....	47
3.3.4 Acoplantes:	47

3.5 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO ULTRASONICO	52
3.5.1 Comprobación de la linealidad del equipo.....	52
3.5.1.1 Linealidad Horizontal.....	56
3.5.1.2 Linealidad vertical.	57
3.5.1.3 Linealidad del control de amplitud.	59
3.5.2 Sensibilidad.	60
3.5.3 Curva de Amplitud-Distancia (CAD).	61
3.5.3.1 Evaluación de discontinuidades.	62
3.5.4 Caracterización de los palpadores.....	62
3.5.4.1 Caracterización de palpadores normales.....	62
3.5.4.2 Caracterización de palpadores angulares.....	65
3.5.5 Bloques de referencia.....	72
3.5.5.1 Bloque SDH.....	72
3.5.5.2 Bloque 10W.....	73
3.5.5.3 Bloque de acero 25x150x250.	73
3.5.5.4 Bloque IIW V1.	74
3.5.5.5 Bloque IIW V2.	75
3.5.5.6 Bloques ASTM.....	75
3.5.5.7 Otros tipos de bloques.	76
4. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ULTRASONIDOS.....	78
4.1 MÉTODOS DE ENSAYO	78
4.1.1 Método De Pulso-Eco.....	78
4.1.2 Método de resonancia.....	82
4.1.3 Método de transmisión	84
4.1.3.1 Método de transmisión directa:.....	85
4.1.3.2 Método de transmisión con reflexión.....	86
4.1.3.3 Método de transmisión con conducción:	86
4.2 TÉCNICAS DE ENSAYO	87
4.2.1 Técnica de contacto:	88
4.2.2 Técnica de inmersión.....	88
4.2.2.1 Ensayo con haz normal	90
4.2.2.2 Ensayo con haz angular.....	91
4.2.3 Técnicas por amplitud y difracción del haz ultrasónico.....	91

4.2.3.1	Técnica por Difracción en el Tiempo de Vuelo (TOFD)	92
4.2.3.2	Técnica de Comparación de Amplitudes (ACT)	94
4.2.3.3	Técnica Diferencial de Distancia-Amplitud (ADDT).....	94
4.3	COMPARACIÓN DE TÉCNICAS Y MÉTODOS DE ENSAYO	95
5.	NORMATIVIDAD EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ULTRASONIDOS ..	97
5.1	NORMALIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN	97
5.1.1	Principales organismos reguladores de normas en ensayos no destructivos.	97
5.1.1.1	ASTM. (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales).	97
5.1.1.2	API. (Instituto Americano de Petróleos).....	98
5.1.1.3	ASNT. (Sociedad Americana para Ensayos no Destructivos).....	98
5.1.1.4	ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación).	99
5.1.1.5	SIC (Superintendencia de industria y comercio)	99
5.2	SÍNTESIS DE LAS PRINCIPALES NORMAS EN END EMPLEANDO ULTRASONIDO	100
5.2.1	ASTM E213 (Procedimiento para Examen Ultrasónico de Tuberías de producción)	100
5.2.2	NTC 2120 Guía Para La Inspección de Soldadura Mediante Ensayos No Destructivos	101
5.2.3	API RP 5UE: Práctica Recomendada para evaluación ultrasónica de imperfecciones en tubería	102
5.2.3.1	PROPÓSITO	102
5.2.3.2	APLICABILIDAD.....	102
5.2.3.3	CERTIFICACIÓN DEL PERSONAL PARA ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.	103
5.2.3.4	DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE EVALUACIÓN ACT y ADDT	103
5.2.3.5	CRITERIOS GENERALES DE INSPECCIÓN:	109
5.2.3.6	ESTANDARIZACIÓN	112
5.2.3.7	PROCEDIMIENTOS DE INSPECCIÓN	112
6.	CONCLUSIONES	115
	BIBLIOGRAFÍA	118
	ANEXOS	121
A.	FUNDAMENTOS DE TUBERIAS.....	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Frecuencias del sonido	9
Figura 2. Palpador-Tranductor	9
Figura 3. Ensayo ultrasónico por pulso eco	10
Figura 4. Ensayo ultrasónico por transmisión.	11
Figura 5. Ensayo ultrasónico por resonancia.	12
Figura 6. Ensayo ultrasónico por contacto	12
Figura 7. Ensayo por inmersión	13
Figura 8. Tren de ondas	14
Figura 9. Amplitud de una onda	14
Figura 10. Ciclo de una onda.....	14
Figura 11. Longitud de onda	15
Figura 12. Resolución en END por ultrasonido.	16
Figura 13. Haz ultrasónico	18
Figura 14. Zona muerta del haz ultrasónico	19
Figura 15. Ondas longitudinales.....	20
Figura 16. Ondas transversales	21
Figura 17. Ondas superficiales.....	21
Figura 18. Ondas Lamb a) simétrica y b) asimétrica	22
Figura 19. Ángulo de incidencia	23
Figura 20. Conversión de Modo del Haz Incidente.	24
Figura 21. Ángulos incidentes.....	25
Figura 22. Diagrama de bloques de un equipo ultrasónico tradicional	26
Figura 23. Circuito de Amplificación	28
Figura 24. Circuito Receptor o Amplificador	29
Figura 25. Zona muerta del haz ultrasónico	30
Figura 26. Componentes del tubo de rayos catódicos – TRC	31
Figura 27. Ajuste en la intensidad del haz de electrones	32
Figura 28. Equipo ultrasónico	33
Figura 29. Elementos de un palpador.....	36
Figura 30. Izquierda Cristal de cuarzo, Derecha: Efecto piezoeléctrico.....	37
Figura 31. Cristal de cuarzo corte en X	37
Figura 32. Representación esquemática del proceso de polarización par cerámicas piezoeléctricas.	38
Figura 33. Comparación entre un transductor piezoeléctrico y uno EMAT	39
Figura 34. Palpador de cristal único	42
Figura 35. Palpador doble cristal	43
Figura 36. Palpador de haz angulado	43
Figura 37. Palpadores de inmersión. Izq. palpador plano, Der. palpador focalizado	44
Figura 38. Aumento en sensibilidad para discontinuidades pequeñas	45
Figura 39. Izquierda focalización a un punto, Derecha focalización a una línea	45
Figura 40. Focalización superficies curvas.....	46

Figura 41. a. Placa electrostrictiva cóncava; b. Lente convergente	46
Figura 42. Palpador de escobilla.....	47
Figura 43. Acoplante.....	48
Figura 44. Representación de datos tipo A-Scan	50
Figura 45. Presentación de datos tipo B-Scan.....	51
Figura 46. Presentación de datos tipo C-Scan	52
Figura 47. Calibración en recorrido con bloque V1.....	54
Figura 48. Calibración en recorrido con el bloque V2	55
Figura 49. Diagrama superficie-amplitud	59
Figura 50. Curva de Corrección Amplitud-Distancia	62
Figura 51. Perfil del haz ultrasónico para palpador normal.....	63
Figura 52. Alineación del haz en palpadores normales	64
Figura 53. Representación gráfica del palpador	65
Figura 54. Punto de salida del haz.....	66
Figura 55. Posición nominal y posición real del haz	66
Figura 56. Bloque de referencia V1.....	66
Figura 57. Determinación máxima amplitud del eco	67
Figura 58. Marcación punto exacto de la salida del haz	67
Figura 59. Perfil en el plano vertical	69
Figura 60. Bloque SDH.....	73
Figura 61. Bloque 10W.....	73
Figura 62. Bloque de Acero	74
Figura 63. Bloque IIW V1	74
Figura 64. Bloque IIW V2	75
Figura 65. Bloque ASTM E-127	76
Figura 66. Bloque especial para inspección de piezas forjadas	76
Figura 67. Bloque escalonado.....	77
Figura 68. Discontinuidades artificiales a crear en un estándar de referencia según API 5L.....	77
Figura 69. Elemento sin defectos	78
Figura 70. Representación Pulso-Eco	79
Figura 71. Variabilidad del eco de fondo.....	80
Figura 72. Ecos posibles de reflexión	81
Figura 73. Posición y dimensión de una discontinuidad por el método de pulso-eco	82
Figura 74. Eco de resonancia.....	83
Figura 75. Relación espesor-longitud de onda	83
Figura 76. Método de transmisión	84
Figura 77. Método de transmisión directa.....	85
Figura 78. Método de transmisión con reflexión.....	86
Figura 79. Método de transmisión con conducción	87
Figura 80. Técnica de ensayo	87
Figura 81. Técnica de Inmersión	88
Figura 82. Tanque de Inmersión	89
Figura 83. Ensayo de haz normal y angular	90
Figura 84. Ecos de Inmersión	90

Figura 85. Técnica TOFD.....	92
Figura 86. Comparación TOFD-Pulso Eco	93
Figura 87. TOFD representación de datos Tipo-B	94
Figura 88. Técnica Diferencial de Distancia-Amplitud (ADDT).....	95
Figura 89. Ecos de discontinuidades	101
Figura 90. Técnica ADDT	104
Figura 91. Caída de Amplitud	105
Figura 92. Ancho de compuerta entre ecos	107
Figura 93. Resultado de inspección ADDT	108
Figura 94. Cuña Angular con Haz radial.....	111
Figura 95. Principales fallas en tubería	123

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Guía para la selección de ensayos no destructivos (END)	5
Tabla 2. Niveles de amplificación	28
Tabla 3. Controles del equipo ultrasónico y principales características	33
Tabla 4. Características de los materiales usados en la construcción de transductores en los palpadores	39
Tabla 5. Tolerancias de amplitudes por ganancia	59
Tabla 6. Comparación de técnicas y métodos de ensayo	96

GLOSARIO

Acoplante: sustancia líquida que se usa entre la cara del palpador y la superficie del objeto que se inspecciona, para permitir la transmisión del ultrasonido a través de la interfase creada por el palpador y el material de prueba.

Ancho de banda: corresponde a un rango de frecuencias transmitidas o recibidas. Asociadas ya sea con un rango ancho o angosto.

Atenuación: es la pérdida gradual de energía del sonido al viajar por el material.

Calibración: es establecer con exactitud la correspondencia entre las indicaciones de un instrumento de medida y los valores de la magnitud que se mide con él.

Capilaridad: es una propiedad de los líquidos que le confiere la capacidad de ascender o bajar por un tubo estrecho, gracias a las fuerzas de atracción entre sus moléculas y la pared interior del tubo (fuerzas de adhesión).

Cero acústico: es el punto exacto en el tiempo cuando el sonido entra a la parte que se inspecciona.

Cero eléctrico: es el punto exacto en el tiempo en el que se pulsa el transmisor. Asociado con la imagen del pulso inicial en pantalla.

Ciclo: Un término que se usa para describir el desplazamiento de la partícula. Un ciclo es igual a dos desplazamientos completos en direcciones opuestas

Circuito del Reloj: es el que provee los intervalos base de tiempo para cada uno de los otros circuitos que conforman el equipo ultrasónico.

Compresión: la aglomeración de partículas en una onda ultrasónica. Contrario a rarefacción.

Compuerta Electrónica: define o Delinea la porción de la imagen del barrido que se desea investigar.

Control de amortiguar ("Damping"): Provee control para las vibraciones indeseables del transductor.

Control de Corrección Amplitud-Distancia (DAC): Provee compensación electrónica para la atenuación.

Control de Ganancia (Gain): Provee cambios calibrados para la indicación de amplitud.

Control de Rango: provee compensación entre la velocidad del material y el espesor relativo para la imagen de barrido distancia-tiempo.

Control de retardo "delay": es un control que sirve para cambiar simultáneamente las indicaciones horizontales en el barrido (sweep) del TRC (línea base de tiempo) mientras se mantiene la relación constante de tiempo-distancia.

Conversión de Modo: El cambio de una onda de un modo a otro. Generalmente asociado con el cambio de ondas longitudinales a transversales.

Cristal o elemento: El elemento piezoeléctrico en la unidad de inspección o probador (palpador).

Cuarzo: es un material cristalino que tiene propiedades piezoeléctricas.

Curva de Corrección Amplitud-Distancia: un Método Gráfico que toma en cuenta la atenuación del material. Los porcentajes de esta curva se usan muy frecuentemente como criterio para aceptar o rechazar.

Decibel (dB): Una unidad de medida asociada con la intensidad del sonido o presión acústica.

Defectología: es detectar, ubicar y evaluar la presencia de defectos.

Densidad: relación entre la masa y el volumen de una sustancia o cuerpo:

Difracción: Dispersión de un rayo de luz cuando es interceptado por un obstáculo, como otro rayo, un cuerpo opaco o una abertura estrecha

Discontinuidad: Una interrupción en la continuidad de un material.

Divergencia del Haz: es la divergencia del ultrasonido de su eje central. Es un efecto característico de la zona lejana.

Elasticidad: La habilidad de un material a deformarse bajo esfuerzos y regresar a sus dimensiones originales al eliminar estos.

Electroestricción: cambios de dimensiones que exhibe ciertos materiales cuando se aplica un campo eléctrico externo. Este efecto es debido a la fuerte polarización que sobre el material ejerce el campo externo.

Epoxi: es un tipo de resina sintética, dura y resistente, utilizada en la fabricación de plásticos, pegamentos, etc.

Ferroeléctrico: Un material polarizado espontáneamente que cambiará su dirección de polarización cuando se le aplica un campo eléctrico.

Frecuencia: es el número de ciclos completos en el movimiento de una onda por unidad de tiempo, generalmente un segundo. Se abrevia Hz (ciclos por segundo), KHz (mil ciclos por segundo), MHz (un millón de ciclos por segundo).

Frecuencia de repetición de pulsos: Provee control para el número de veces que el transductor es pulsado eléctricamente por unidad de tiempo.

Frecuencia Resonante: Una frecuencia específica a la cual el material vibrara en simetría con la fuerza que se la aplica.

Generador de Barrido: provee la información Recibida al TRC.

Grafica Tipo-A: es un tipo de presentación grafica que provee información de amplitud y distancia-tiempo.

Grafica Tipo-B: es un tipo de presentación grafica donde los datos de la pieza inspeccionada se muestran como una vista de su sección transversal (vista lateral).

Grafica Tipo-C: es un tipo de presentación en que los datos de la pieza inspeccionada se muestran en un plano (vista superior).

Goniómetro: instrumento que sirve para medir ángulos.

Imagen de Barrido: la representación en el TRC. Es la línea horizontal en la porción de abajo de la pantalla, a la que nos referimos como línea base-tiempo.

Impedancia Acústica Específica: es una unidad que se utiliza para medir la cantidad de resistencia ofrecida por el material a la propagación del sonido. Es el producto de la velocidad del material por su densidad.

Incidencia Angular: es el ángulo en que el ultrasonido se introduce en la interfase, no perpendicular o normal.

Incidencia Normal o Vertical: cuando el ultrasonido choca contra la superficie a un ángulo de 90 grados.

Indicación: es la imagen con la que se muestra una discontinuidad, equivale a la señal luminosa en la pantalla.

Indicación guía: el primer punto en el tiempo donde la indicación rompe el barrido horizontal. Opuesto a la indicación de arrastre (trailing edge).

Indicaciones No Genuinas (falsas): indicaciones creadas por tamaños grandes de grano, cambios bruscos en la estructura metalúrgica, etc. Comúnmente las llamamos ruido.

Índice del Haz: el centro exacto del haz ultrasónico al salir del bloque o cuña de lucita.

Impedancia acústica: es la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre él. Resistencia del medio a la vibración acústica de las partículas.

Interferómetro: es un instrumento que emplea la interferencia de las ondas de luz para medir con gran precisión longitudes de onda de la luz misma.

Linealidad: una relación constante exhibida entre las indicaciones asociadas con la porción horizontal y vertical del despliegue de la imagen en la pantalla.

Longitud de Onda: la distancia (comúnmente medida en pulgadas) que una onda de sonido viaja al hacer un ciclo completo.

Material de relleno: es un material que se usa en la construcción del palpador con el propósito de eliminar la vibración prolongada o indeseada del cristal transductor.

Múltiplos: Indicaciones repetitivas en el TRC que corresponden a la superficie opuesta o de fondo de la pieza.

Nivel de Sensibilidad de Referencia: el grado de sensibilidad, designado generalmente por un ajuste de ganancia en dB. La sensibilidad establecida a un reflector de referencia.

Onda (ultrasonido): una vibración en las partículas del material que transfiere energía progresivamente de un punto a otro dentro de este.

Ondas de Lamb (laminares): un modo de onda ultrasónica para inspeccionar láminas o tubos muy delgados.

Onda longitudinal o de compresión: un modo de onda ultrasónica en la cual la vibración de las partículas es paralela a la dirección de propagación.

Ondas superficiales o de Rayleigh: un modo de onda ultrasónica en que el sonido viaja en la superficie de la parte y cuyo movimiento vibracional de la partícula es elíptico.

Palpador: Dispositivo electroacústico usado para transmitir, recibir o transmitir y recibir la energía ultrasónica. Generalmente consiste de una placa de datos, conector, cable coaxial, carcasa o cubierta y uno o varios elementos piezoeléctricos (transductor) y cara de desgaste.

Palpador con elemento doble: Un palpador que tiene separados los elementos para enviar y recibir con el propósito de incrementar la resolución cerca de la superficie.

Palpador de Angulo Normal: es un palpador que se usa para propagar el ultrasonido perpendicularmente a la superficie de inspección, o muy cerca de incidencia normal.

Palpador de escobilla: Un palpador capaz de inspeccionar grandes áreas superficiales debido a usar múltiples cristales.

Palpador de haz Angulado: es un palpador construido de tal manera que el sonido se propaga en una orientación no perpendicular a la superficie del objeto.

Pantalla-media horizontal: Un punto a medio camino entre el extremo izquierdo y el derecho del barrido horizontal del TRC.

Perfil del Haz: es la configuración real del haz ultrasónico. Algunos códigos o procedimientos requieren que el perfil del haz del transductor se verifique durante la calibración. Esta información se usa para determinar la longitud, altura, etc., de una discontinuidad.

Periodo: Tiempo que tarda la onda ultrasónica en completar un ciclo.

Pico o maximizar: el punto más alto de una indicación. También se refiere a la manipulación del palpador para maximizar la amplitud de la indicación desplegada.

Piezoeléctrico: es la habilidad de ciertos materiales para convertir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa.

Placas de Deflexión: Un dispositivo localizado en el TRC para dirigir la corriente de electrones. Se asocian con la posición horizontal y vertical de la imagen en el TRC. (También llamadas laminillas de deflexión)

Polarización: la condición de tener un potencial eléctrico.

Primer Angulo Critico: el ángulo de incidencia que se requiere para refractar la onda longitudinal 90 grados; ponerla paralela a la superficie.

Propagación: El avance de una onda a través de un material.

Propiedades Acústicas: son las características ultrasónicas del material, como son la velocidad (rapidez con que el sonido viaja en el material) y la atenuación (pérdida de energía).

Pseudocolor: también llamado falso color, consiste en asignar colores a valores de gris de una imagen monocromática siguiendo algún criterio en específico.

Pulso-Eco: método de Ensayo Ultrasónico que usa el sonido reflejado como medio de recaudar información.

Pulso Inicial (eco inicial): La indicación mostrada al extremo izquierdo de la pantalla que corresponde al cero eléctrico. No se debe usar para calibraciones.

Punto de Curie: la temperatura en la cual se verán influenciadas las cargas positivas y negativas (dominios) del material. Calentando un material polarizado por encima de su punto de curie perderá toda su polarización (se desmagnetiza)

Radiación Lateral (Lobular): es la radiación que se genera en los extremos laterales del palpador.

radio-frecuencia: Un término usado para identificar forma de onda positiva y negativa de un pulso eléctrico.

Rarefacción: el alejamiento entre sí de las partículas en una onda ultrasónica. Lo opuesto a compresión.

Receptor: recoge las señales de ultrasonido que regresan.

Rectificar: El proceso de eliminar el medio ciclo negativo de un pulso eléctrico.

Reflector Finito: una superficie reflectiva que es más pequeña que la sección transversal del haz ultrasónico.

Reflector Infinito: una superficie reflectiva que es mayor en tamaño que la sección transversal del haz ultrasónico.

Reflector de Referencia: Una discontinuidad producida artificialmente para comparar la reflectividad de una discontinuidad a un criterio de aceptar / rechazar en base a la amplitud de la indicación. Los reflectores de referencia se maquinan comúnmente en un material de prueba representativo y pueden ser agujeros perforados lateralmente, agujeros con fondo plano, ranuras en V, en U o cuadradas, o en cualquier otra forma que se requiera. (Llamados también orificio mecanizado)

Reflexión: El cambio en dirección de una onda ultrasónica al golpear una superficie.

Reflexión de Fondo: es una indicación en la pantalla que corresponde al eco de la superficie opuesta al palpador en la parte que se examina.

Refracción: El doblamiento o cambio de dirección de una onda ultrasónica al pasar por la interfase entre dos materiales con propiedades acústicas diferentes.

Resolución: La habilidad del sistema de prueba con ultrasonido para distinguir entre reflectores que se encuentran muy cerca uno del otro dentro del material.

Resolución cerca de la Superficie: la habilidad del sistema ultrasónico para desplegar reflectores que se encuentran cerca de la superficie de la pieza que se inspecciona.

Segundo Angulo Crítico: el ángulo de incidencia requerido para refractar la onda transversal en 90 grados (paralela a la superficie de entrada).

Sensibilidad: la habilidad del sistema para detectar reflectores pequeños.

Transductor: Un dispositivo usado para convertir una forma de energía en otra.

Transmisión directa (de lado a lado): Un método de ensayo en que la energía ultrasónica es transmitida con un palpador y recibida por otro en el lado opuesto.

Transmisor: provee los pulsos eléctricos al transductor.

Transversal (onda cortante): Un modo ultrasónico en el que la vibración de la partícula es perpendicular a la velocidad de propagación.

Tubo de Rayos Catódicos (TRC): Un dispositivo para la imagen. Una corriente de electrones se proyecta a la cara del tubo, creando imágenes para la inspección visual.

Ultrasonido: son vibraciones mecánicas que tienen un rango de frecuencias por encima del sonido audible.

Velocidad: la rapidez con que el sonido viaja a través del material.

Velocidad longitudinal: la rapidez con que el sonido viaja a través de determinado material, La velocidad del sonido varía dependiendo del medio a través del cual viajen las ondas sonoras.

Volumétrico: un método de Ensayos No Destructivos que revela discontinuidades en el volumen total del material (discontinuidades internas)

Zapata o cuña sólida: pieza que puede ser fija o móvil y va acoplada entre el palpador y la pieza a examinar. Para determinados ángulos permite obtener ondas longitudinales o transversales.

Zona Cercana: el área del haz de ultrasonido que se localiza entre la Zona Muerta y la Zona Lejana. Se caracteriza por tener intensidades ultrasónicas (presiones acústicas) irregulares.

Zona Lejana: el área de un haz de ultrasonido que empieza al terminar la zona cercana y se extiende hasta el punto de atenuación del ultrasonido.

Zona Muerta: el área del material directamente bajo el palpador donde la detección de discontinuidades es imposible.

*Fuente: Tomado de [1] [2]

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Revisar, analizar y sintetizar los procedimientos, normativas y el desarrollo del uso de ensayos no destructivos por ultrasonido aplicados a la inspección de tuberías.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las Normativas y terminología utilizadas en los END por ultrasonido.
- Documentar los principios de funcionamiento y procedimientos utilizados en las diferentes técnicas de END por ultrasonido aplicados a las tuberías.
- Documentar los fundamentos teórico-técnicos necesarios para la calibración de un instrumento para END por ultrasonido.

JUSTIFICACIÓN

Las grandes compañías, en sus procesos de producción, depende de la confiabilidad, donde, "La Confiabilidad operacional se define como una serie de procesos de mejora continua, que incorporan en forma sistemática, avanzadas herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial" [3]

Actualmente para implementar la confiabilidad en las operaciones en las empresas se desarrollan programas de mantenimiento predictivo e inspección de materiales, como los ensayos no destructivos, cuya finalidad es detectar defectos o fisuras de los materiales en servicio, antes de que estos puedan producir fallas.

Una de las técnicas de ensayos no destructivos más utilizada en la industria es el ultrasonido. Este método de control de calidad posee un alto grado de precisión, menores costos, gran poder de penetración en los materiales evaluados, permite la inspección de grandes y pequeños espesores, posee gran sensibilidad, permite detectar discontinuidades extremadamente pequeñas; además proporciona gran exactitud para determinar la posición, tamaño, orientación y forma de dichas discontinuidades en el material bajo prueba.

Teniendo en cuenta las anteriores características el ensayo no destructivo ideal para el diagnóstico y detección de posibles fallas en tuberías metálicas es el ultrasonido.

Esta investigación, estudia las diferentes técnicas que se utilizan en los END por ultrasonidos en la inspección de tuberías; esto, teniendo en cuenta que actualmente en Colombia se desarrollan este tipo de prácticas, con el fin de predecir las fallas que puedan ocurrir en diferentes tipos de tuberías; por lo que es importante como profesionales de ingeniería e instrumentación, conocer y estudiar los procedimientos que involucran los ensayos no destructivos por ultrasonido como técnica de mantenimiento predictivo.

Adicionalmente, se espera que los resultados de esta investigación sean un punto de partida para aprovechar las ventajas y propiedades que los ensayos no destructivos ofrecen para seguir con otros proyectos en la universidad que profundicen la línea de inspección y mantenimiento predictivo.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO:	Desarrollo y Procedimientos para la Utilización de Técnicas de Ensayos No Destructivos con Ultrasonido para Inspección de Tuberías
AUTOR(ES):	Lizeth Paola Barrera Suárez Martha Marcela Coronel Picón
FACULTAD:	Facultad de Ingeniería Electrónica
DIRECTOR(A):	Raquel Díaz Ramírez

RESUMEN

El ultrasonido es uno de los métodos de ensayos no destructivos más utilizados actualmente. Por medio de él se puede realizar inspecciones que permiten comprobar la idoneidad interna de un material. Dentro de sus aplicaciones se encuentran; medición de espesores en materiales, examinar materiales por discontinuidades, inspección de soldaduras, inspección de Tuberías, entre otros.

Para llevar a cabo una inspección por ultrasonido, se requiere de un equipo ultrasónico, el cual, está compuesto por varios elementos dentro de los cuales se destaca el palpador, pues éste equivale a los ojos del equipo. Además, su aplicación como método de inspección no destructiva, puede realizarse utilizando diferentes métodos y técnicas, que permiten adaptarse a los diferentes materiales, ambientes y condiciones de trabajo.

Dado que en la Facultad de Ingenierías de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga, y en especial en la Especialización de Control e Instrumentación Industrial, no se cuenta con información acerca del ultrasonido como método de ensayo no destructivo, se vio la necesidad de realizar una revisión bibliográfica que permitiera recopilar información pertinente acerca de este tema.

El resultado final como trabajo de monografía, corresponde a un documento donde se describen los principios de funcionamiento y los procedimientos utilizados por el ultrasonido como método de inspección no destructiva, su aplicación a la inspección de tuberías y las normas que lo rigen.

PALABRAS CLAVES: Ensayo no destructivo, ultrasonido, frecuencia, palpador, transductor, discontinuidad, pulso-eco, resonancia, transmisión, normatividad

ABSTRACT

TITLE: Development and Procedures for the Use of Non Destructive Ultrasonic Testing Techniques in Pipe Inspection.

AUTHORS: Lizeth Paola Barrera Suárez
Martha Marcela Coronel Picón

FACULTY: Electronic Engineering

DIRECTOR: Raquel Díaz Ramírez

DESCRIPTION

Ultrasonic techniques are one of the most used non destructive testing techniques. This is a way to carry out inspections that allow confirmation of the internal suitability of materials. Among their uses some can be mentioned: measuring the width of materials, examining materials of discontinuity, welding inspecting, inspecting pipes, etc.

To carry out ultrasonic inspections, ultrasonic equipment is necessary. This is made up of different elements, among which the transducer, considered as the eyes of the set, can be highlighted. In addition, this procedure can be done through different methods and techniques that facilitate their usage in different materials, setting, and work conditions.

In view of the fact that the faculty of Engineering at Universidad Pontificia Bolivariana in Bucaramanga and specially in the Especialización en Control e Instrumentación Industrial (Specialization in Industrial instrumentation and control), does not have relevant information about non destructive ultrasonic testing method, it was necessary to carry out a literature review to collect information about the issue.

The final result in this project is a document that describes the principles of the functioning and procedures used in ultrasonic techniques as a non destructive testing method, its application in pipelines testing and its rules..

KEY WORDS: Non Destructive Testing, Ultrasonic Testing, frequency, transducer, discontinuities, Pulse-Echo, resonance, transmitter, regulations.

INTRODUCCIÓN

Durante años la industria en general ha trabajado de la mano con los avances tecnológicos, de manera que estos le permitan mejorar sus procesos y brindar mayor protección a los recursos tanto humanos como materiales, permitiéndole hacer de sus empresas negocios productivos. Uno de los factores de mayor importancia para las empresas es el análisis de fallas, ya que su predicción y prevención permitirá garantizar la seguridad, el funcionamiento y uso eficiente de los componentes y/o máquinas a lo largo de su vida útil.

Para ayudar en las tareas antes mencionadas, se desarrollaron los ensayos no destructivos (END¹), como una alternativa que permite realizar la inspección sin afectar la utilidad del proceso. En la actualidad, existen diferentes métodos de ensayos no destructivos, pero en esta ocasión se pretende resaltar el uso del ultrasonido como END; ya que se presenta como uno de los métodos de control de calidad y evaluación de materiales más utilizados en la industria actual, así como uno de los métodos más empleados en la inspección de tuberías.

La presente monografía busca estudiar y brindar una documentación apropiada para el uso del ultrasonido como método de ensayo no destructivo. Donde se describe los principios básicos de funcionamiento y las diferentes técnicas utilizadas para su aplicación en la inspección de tuberías.

¹ END: Ensayos No Destructivos

1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

Los ensayos no destructivos son un conjunto de métodos que se aplican para determinar la calidad de los materiales con el fin de detectar defectos internos o externos mediante procedimientos que no perjudican físicamente al producto inspeccionado considerándose así una herramienta fundamental en el campo industrial.

Dentro de los diferentes ensayos no destructivos que se utilizan están:

- Inspección visual.
- Radiografía.
- Corrientes inducidas.
- Ultrasonido.
- Líquidos penetrantes.
- Partículas magnéticas.

El propósito de la utilización de los ensayos no destructivos es analizar la defectología, caracterizarla y luego evaluarla, para esto se definen los criterios de aceptación o rechazo en cada aplicación específica. Los defectos pueden ser inherentes cuando son originados en el proceso de producción inicial, de proceso cuando se causan en servicio o cuando surgen debido al uso del producto.

Entre los métodos de inspección superficial cuya función principal es detectar y evaluar las discontinuidades abiertas y cercanas a la superficie de los materiales, se encuentra la inspección visual, los líquidos penetrantes, las partículas magnéticas y las corrientes inducidas.

Entre los métodos de inspección volumétrica los cuales se emplean para verificar la idoneidad interna de los materiales y comprobar el grado de integridad de un material en su espesor, se utiliza la radiografía y el ultrasonido.

1.1 INSPECCIÓN VISUAL

La inspección visual y óptica es aquella que utiliza la energía de la porción visible del espectro electromagnético. Los cambios en las propiedades de la luz, después de entrar en contacto con el objeto inspeccionado, pueden ser detectados por el ojo humano o por un sistema de inspección visual.[4]

La inspección visual es el método de ensayo no destructivo que está presente en todo el ciclo de vida del material. Consiste en revisar la calidad de las superficies, revelando defectos de superficie durante la manufactura y posteriormente en la operación. Su objetivo es detectar y examinar una gran variedad de fallas superficiales tales como: abrasión, daños mecánicos,

procesos de fabricación, corrosión, contaminación, acabado y discontinuidades en uniones, como soldaduras, sellados, conexiones soldadas etc. [5]

1.2 RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL [5]

La inspección por radiografía industrial es un procedimiento de inspección no destructivo, diseñado para detectar discontinuidades macroscópicas y variaciones en la estructura interna o configuración física en una amplia variedad de materiales.

El principio físico de este método se basa en la interacción entre la materia y la radiación electromagnética, la energía de los rayos X o gamma es absorbida o atenuada al atravesar el material, esta atenuación es proporcional a la densidad, espesor y configuración del material inspeccionado. La radiación ionizante que logra traspasar el material puede ser registrada por medio de la impresión en una película radiográfica, que posteriormente se somete a un proceso de revelado para obtener la imagen del área inspeccionada.

1.3 CORRIENTES INDUCIDAS [6]

El ensayo por corrientes inducidas se basa en la medida de los cambios de impedancia inducidos en un material conductor eléctrico. Consiste en hacer pasar una corriente alterna por un solenoide, la cual genera un campo magnético. Al colocar la pieza a inspeccionar en dirección perpendicular al campo magnético creado por el solenoide, se generan corrientes inducidas (Corrientes de Eddy) circulares en la pieza. Las corrientes eléctricas inducidas van a producir un campo magnético (secundario), que se va a oponer al campo magnético del solenoide (primario) y modificará la impedancia de la bobina. La consiguiente variación de la corriente eléctrica que circula por la bobina es el parámetro que se mide y registra. Los defectos existentes en la pieza interrumpen las corrientes de Eddy, lo que provoca que el campo magnético producido por dichas corrientes sea menor.

1.4 ULTRASONIDO

El ensayo no destructivo por ultrasonidos se basa en el uso de una onda sonora de alta frecuencia, que se transmite a través de un medio físico, para la detección de discontinuidades internas y superficiales o para medir el espesor de paredes. [6]

En los próximos capítulos se profundizará en ese método de ensayo no destructivo.

1.5 LÍQUIDOS PENETRANTES

El ensayo de líquidos penetrantes es un método no destructivo para la localización de discontinuidades superficiales, basado en la acción de capilaridad de los líquidos². El líquido se aplica a la superficie del artículo, y se da suficiente tiempo para que penetre en las discontinuidades superficiales, luego se procede a limpiar la superficie de este líquido y se aplica un revelador (talco o un material mineralizado) que absorbe el líquido sobrante que ha penetrado en las discontinuidades y lo trae a la superficie, amplificando la información de la discontinuidad.

1.6 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS [5]

La inspección por Partículas Magnéticas es un ensayo no destructivo que permite detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos.

El principio del método es la formación de distorsiones del campo magnético o de polos cuando se genera o se induce un campo magnético en un material ferromagnético; es decir, cuando la pieza presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, éste se deforma o produce polos. Las distorsiones o polos atraen a las partículas magnéticas, que fueron aplicadas en forma de polvo o suspensión en la superficie sujeta a inspección y que por acumulación revelan las discontinuidades que se observan visualmente de manera directa o bajo luz ultravioleta

1.7 GUÍA PARA LA SELECCIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

En la tabla 1. Se muestra una guía para la selección de ensayos no destructivos (END) modificada por los autores, en la cual, se especifica las aplicaciones ventajas, desventajas y equipo utilizado en cada uno de los métodos de ensayos no destructivos, basado en el apéndice A de las normas técnicas colombianas NTC 2120 Guía Para La Inspección de Soldadura Mediante Ensayos No Destructivos. [7]

² La capilaridad es una propiedad de los líquidos que le confiere la capacidad de ascender o bajar por un tubo estrecho, gracias a las fuerzas de atracción entre sus moléculas y la pared interior del tubo (*fuerzas de adhesión*).

Tabla 1. Guía para la selección de ensayos no destructivos (END)

Guía para la selección de ensayos no destructivos (END)			
Equipo necesario	Aplicaciones	Ventajas	Limitaciones
Visual			
Lupas, realzador del color, proyectores, reglas, micrómetros, comparadores, ópticos. Fuente de luz.	Soldadura con discontinuidad en la superficie, sellos, abrasión, daños mecánicos, corrosión, acabados.	Económica, conveniente, requiere poco entrenamiento y equipo para muchas aplicaciones.	Se limita sólo a condiciones externas o superficiales. Se limita a la agudeza visual del observador o inspector.
Líquido penetrante			
Líquido penetrante tinturado o fluorescente, reveladores, limpiadores (solventes, emulsionantes, entre otros). Dispositivo adecuado de limpieza. Fuente de luz ultravioleta si se usa tinte fluorescente.	Discontinuidades de soldadura en la superficie (grietas y porosidades). Inspección en procesos de fabricación, inspección de principalmente de metales, elementos de máquinas y componentes aeronáuticos	Equipo portátil económico. Resultados de inspección convenientes. Los resultados se interpretan fácilmente. No requiere electricidad excepto para fuentes de luz.	Películas superficiales (recubrimientos, óxido, manchas ocultas del metal o defectos rechazables ocultos). Filtración por porosidad disimula señales. Las partes deben limpiarse antes y después de la inspección. No proporciona registros permanentes
Partículas magnéticas			
Puntas de prueba, yugos, bobinas adecuadas para inducir magnetismo en la soldadura. Fuente de energía (eléctrica). Polvos magnéticos (algunas aplicaciones requieren de instalaciones especiales y luz ultravioleta)	Discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos. Este tipo de aplicación es el más adecuado para fisuras	Económica. Equipo de inspección portátil. A diferencia de los líquidos penetrantes, las partículas magnéticas pueden detectar algunas discontinuidades que están ligeramente por debajo de la superficie.	Sólo aplicable a materiales ferromagnéticos. Las partes se deben limpiar antes y después de la inspección. Recubrimientos gruesos ocultan discontinuidades rechazables. Requiere el uso de electricidad. Sólo detectan discontinuidades perpendiculares al campo.
Radiografía Industrial			
Fuentes de rayos gama, proyectores de cámaras de rayos gama, blindaje de plomo, equipo de procesamiento de películas, visores de películas, instalaciones de exposición, equipo para el monitoreo de la radiación. Fuentes de rayos X (máquinas), fuentes de alimentación eléctrica.	Discontinuidades macroscópicas y variaciones en la estructura interna de materiales. Soldaduras que tienen discontinuidades voluminosas tales como porosidad, penetración, corrosión, etc. Aplicaciones para evaluar requisitos dimensionales (el espesor)	Capacidad de inspección superficial y subsuperficial. Ayudan a la caracterización de las discontinuidades. Proporciona un registro permanente para futuras consultas. Permite determinar el tipo, tamaño y ubicación de la discontinuidad con exactitud.	Elevado costo inicial de los equipos de rayos X y gama. Generalmente no se considera portátil. La red implica un peligro potencial para el personal. La pieza de inspección debe tener acceso al menos por dos lados.
Ultrasonido			
Un instrumento de pulso y eco capaz de excitar un material piezoeléctrico y generar energía ultrasónica dentro de la soldadura y una pantalla de tubo catódico capaz de mostrar las magnitudes de la energía de sonido recibido. Estándares de calibración, elementos para el acoplamiento de líquidos.	Medición de espesores, detección de zonas de corrosión, detección de defectos en piezas que han sido fundidas, forjadas, o soldadas. Sencillo y fácil de aplicar como método de inspección para el control de calidad. Este método también se puede usar para verificar el espesor.	Ultrasensible a las discontinuidades planas. Los resultados de ensayo se saben inmediatamente. Equipo portátil. La mayoría de los detectores ultrasónicos de fallas no requieren salida de alimentación eléctrica. Alta capacidad de penetración (superficiales y subsuperficiales.)	Las condiciones de la superficie deben ser adecuadas para acoplar el transductor, limitada por la geometría, estructura interna, espesor y acabado superficial de los materiales sujetos a inspección. Se requieren elementos para el acoplamiento de líquidos. Las partes pequeñas o delgadas son difíciles de inspeccionar por este método. Se requieren patrones de referencia.
Corrientes inducidas			
Capaz de inducir campos electro-magnéticos dentro de una soldadura y de detectar las corrientes eléctricas resultantes (parásitas) inducidas con una sonda o detector.	Discontinuidades expuestas a la superficie (grietas, porosidad, fusión incompleta). Contenido de aleaciones, variaciones en el tratamiento térmico	Equipo portátil y automatizable, para lograr un ensayo relativamente económico y de alta velocidad. Inspecciona las soldaduras recubiertas.	Profundidad de inspección relativamente baja. Muchas variables de ensayo y material pueden afectar la señal del ensayo.

* Adaptado de [7].

En la Tabla 1, se observa que, en el campo de los ensayos no destructivos, el ultrasonido es uno de los métodos de inspección de mayor aplicación en la actualidad ya que ofrece una ventaja significativa frente a otras técnicas que solo inspeccionan la superficie de los materiales; e inclusive sobre la radiografía dado que el ultrasonido penetra a grandes profundidades sobre el material, es portable y ofrece mayor seguridad para los operarios. En los siguientes capítulos se desarrollarán los principios de funcionamiento y procedimientos utilizados en los diferentes métodos y técnicas de END por ultrasonido.

2. FUNDAMENTOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS CON ULTRASONIDO

2.1 ¿QUÉ ES EL ULTRASONIDO?

Las ondas ultrasónicas son ondas mecánicas que consisten en oscilaciones o vibraciones de las partículas atómicas o moleculares de un material respecto a su posición de equilibrio.[8]

Las características del ultrasonido son muy similares a las del sonido audible, se pueden propagar en cualquier medio elástico, que puede ser sólido o líquido. La principal diferencia entre las dos es la frecuencia más elevada presente en el ultrasonido. Mientras el sonido audible tiene frecuencias entre 16Hz y 20 KHz, la frecuencia del ultrasonido usado en ensayos ultrasónicos está en el rango de 200KHz a 25 MHz frecuencias que el oído humano no puede detectar.

El ultrasonido es energía mecánica, el principio de funcionamiento consiste en utilizar la energía vibracional a través de un medio teniendo en cuenta que cualquier objeto en su camino causará una reflexión.

De esta forma los ensayos no destructivos con ultrasonido pueden efectuarse en cualquier material que permita el paso del ultrasonido a través de él. Existen gran variedad de materiales metálicos para su aplicación como fundiciones, forjaduras, tuberías, soldaduras etc. Al los cuales se les puede recaudar una cantidad considerable de información de la parte examinada, como espesor, discontinuidades y en algunos casos según sea la tecnología del instrumento utilizado es posible correlacionar las propiedades acústicas del material con sus propiedades mecánicas, tales como la dureza y la resistencia a la tensión.

2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ULTRASONIDO [7]

A continuación se presentan los principales beneficios de la utilización de la inspección por ultrasonido, en comparación con otros métodos de inspección no destructiva de partes metálicas:

1. El mayor poder de penetración permite detectar discontinuidades profundas.
2. Alta sensibilidad que permite detectar pequeñísimas discontinuidades
3. La mayor exactitud en la determinación de la posición de discontinuidades Internas, estimación del tamaño y caracterización de la orientación, la forma y la naturaleza de éstas.
4. Sólo se requiere una superficie de acceso.

5. El funcionamiento es electrónico, con lo cual se proveen señales casi instantáneas de discontinuidades. Esto hace que el método sea adecuado para interpretación inmediata, automatización, exploración rápida, monitoreo en la línea de producción y control del proceso. Con algunos sistemas, se puede hacer un registro permanente de los resultados de inspección para futura referencia.
6. La capacidad de exploración permite inspeccionar un volumen de metal que se extiende desde la superficie frontal, hasta la superficie trasera de la soldadura.
7. El instrumento ultrasónico es portátil.
8. Es seguro, no compromete la seguridad y salud al operario comparado con los riesgos de la radiografía industrial.

Algunas consideraciones a tener en cuenta para mediciones útiles en la inspección por ultrasonido son:

1. El funcionamiento manual hace necesario que los técnicos experimentados posean conocimientos de operación del instrumento.
2. Se requiere un vasto conocimiento para el desarrollo de procedimientos de inspección.
3. Son difíciles de inspeccionar las secciones del material que son ásperas, de formas irregulares, muy pequeñas, delgadas o heterogéneas.
4. Puede que no sean detectables las discontinuidades que hay en una capa poco profunda, inmediatamente debajo de la superficie.
5. Se requieren elementos de acoplamiento para proporcionar una transferencia efectiva de la energía de onda ultrasónica, entre las unidades de barrido y las partes que se inspeccionan.
6. Se requieren patrones o bloques de referencia para calibrar el equipo.³

2.3 GENERALIDADES DE LOS MÉTODOS Y TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ULTRASONIDO

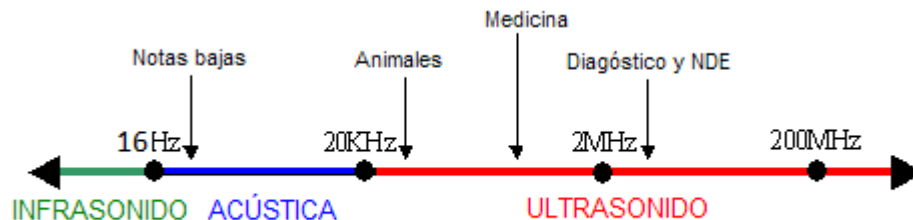
A través de los siglos, el hombre ha intentado utilizar el sonido para evaluar la robustez y calidad de materiales, golpeando las piezas mediante algún instrumento, y escuchando las diferencias de tono que puedan evidenciar la presencia de discontinuidades internas. Esta forma de ensayo se considera como la precursora de lo que conocemos hoy en día, como ultrasonido[9].

En la década de 1940 el Dr. Floyd Firestone desarrolló un instrumento que, por medio de trenes de pulsos sonoros de alta frecuencia, determinaba la profundidad y el tamaño relativo de fallas pequeñas, facilitando inspeccionar piezas de gran espesor o piezas donde solo era posible el acceso a una sola

³ Temática estudiada en el transcurso del documento.

superficie de la misma. De esta forma el ensayo ultrasónico utiliza el sonido como medio para comprobar el material y detectar discontinuidades dentro del mismo, en la Figura 1, se observa que el ultrasonido posee frecuencias más elevadas que las detectadas por el oído humano.

Figura 1. Frecuencias del sonido



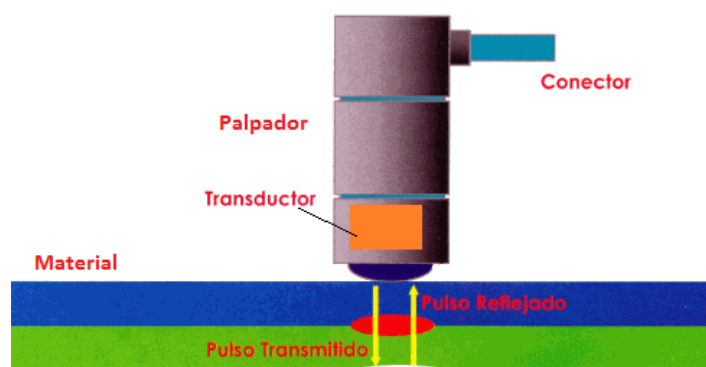
*Fuente: Tomado de [10].

Para generar el sonido de alta frecuencia en el material a examinar se utiliza un elemento transductor compuesto de un material piezoeléctrico (generalmente cristales), el cual tiene la habilidad de convertir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa.

Esta acción se basa en el efecto piezoeléctrico, el cual tiene la característica de que al someter el transductor con energía eléctrica se produce una reacción de expansión y compresión del cristal que permite que éste presente vibraciones originando el ultrasonido.

En la Figura 2 se observa un palpador que es la pieza que tiene contacto con el material a evaluar, el transductor (material piezoeléctrico) es el componente fundamental del palpador.

Figura 2. Palpador-Transductor

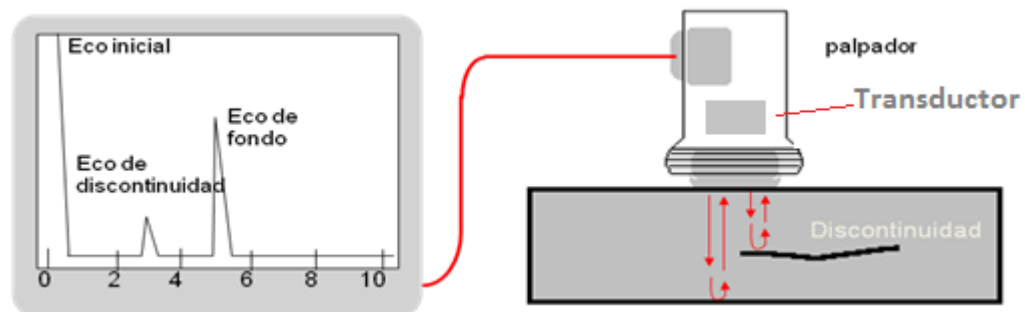


Fuente: Adaptado de [8]

Al acoplar un transductor (por medio del palpador) a la parte que se está examinando, las vibraciones del cristal se transfieren al elemento examinado como un haz de propagación de energía ultrasónica (Eco Inicial), tal como se observa en la Figura 3. Si existe alguna discontinuidad en el camino del haz, se refleja la energía del sonido de vuelta al transductor (Eco de la discontinuidad) y se despliega eventualmente como una indicación en un osciloscopio o pantalla para el usuario.

El sonido de frecuencia elevada es reflejado al llegar a la superficie opuesta del material y recibido nuevamente por el transductor. Esta característica hace posible la medición de espesores y posiciones de discontinuidades en las tuberías o materiales evaluados.

Figura 3. Ensayo ultrasónico por pulso eco



*Fuente: Adaptado de[11]

Existentes diferentes métodos de detección de discontinuidades para la realización de ensayos no destructivos por ultrasonido al igual que diferentes técnicas para el acoplamiento del transductor en la prueba, entre ellos tenemos:

- Ensayo ultrasónico por pulso-eco.
- Ensayo ultrasónico por transmisión.
- Ensayo ultrasónico por resonancia.
- Ensayo ultrasónico por contacto.
- Ensayo ultrasónico por inmersión.

A continuación se describen las generalidades de los mismos y en capítulos posteriores se profundizará en los procedimientos más utilizados para inspección de tuberías.

2.3.1 Ensayo Ultrasónico Por Pulso-Eco

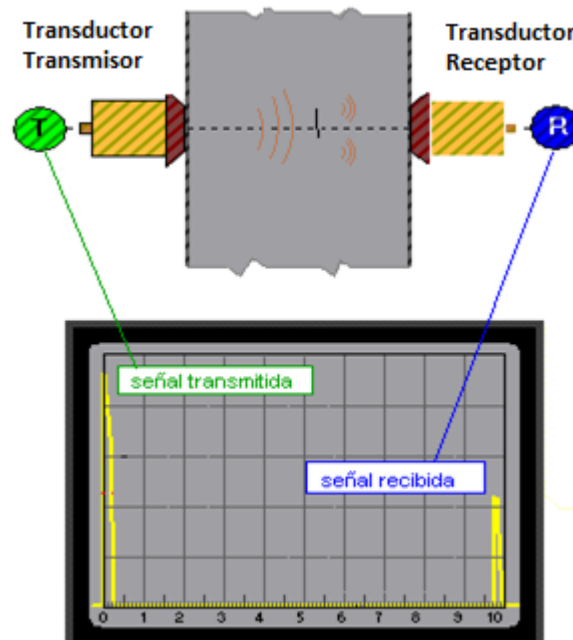
Un método de ensayo ultrasónico muy común, es la técnica pulso-eco, visualizada en la Figura 3. En el cual la energía del sonido reflejada y recibida se convierte nuevamente en energía eléctrica por el elemento piezoeléctrico del transductor y cuya indicación se observa en el TRC (tubos de rayos catódicos) o en otro dispositivo para visualización de los registros.

2.3.2 Ensayo Ultrasónico Por Transmisión

Otro tipo de ensayo ultrasónico es el ensayo por transmisión, en donde se utilizan dos transductores. Uno es el transmisor de sonido de alta frecuencia y otro es el receptor (ver Figura 4).

Una limitación de este método es que no ofrece información de profundidad. Solo puede detectar la presencia de discontinuidades que reducen la propagación del sonido que llega en el receptor. Cuando no hay discontinuidades, la señal recibida tendrá la máxima amplitud o muy cercana a la de emisión. En los próximos capítulos se analizarán las diferentes aplicaciones de este método.

Figura 4. Ensayo ultrasónico por transmisión.

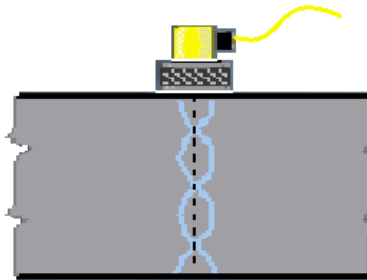


*Fuente: Adaptado de [12]

2.3.3 Ensayo Ultrasónico Por Resonancia

Utiliza un haz continuo de ondas ultrasónicas, enviadas por la vibración del transductor (ver Figura 5). Se varía la frecuencia hasta hallar la frecuencia de resonancia propia del espesor del objeto a inspeccionar. Cuando esto sucede, el material vibra en resonancia con el oscilador y esto implica un incremento en la energía recibida por el transductor. Este incremento de energía puede ser medido por un osciloscopio. La resonancia ocurre cuando el espesor del material es un múltiplo de la mitad de la longitud de onda; esta propiedad se utiliza para evaluar espesores y corrosión; generalmente en láminas delgadas.

Figura 5. Ensayo ultrasónico por resonancia.



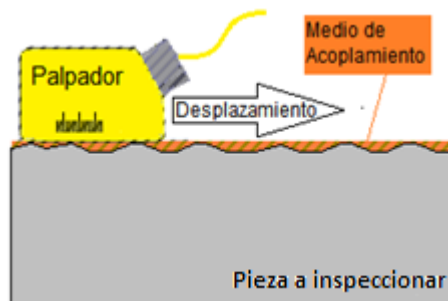
*Fuente: Adaptado de [12]

2.3.4 Ensayo Ultrasónico Por Contacto

En la técnica de contacto el palpador o transductor se desliza sobre la superficie de la pieza una vez que ésta se ha recubierto de una capa delgada y uniforme de un medio de acoplamiento adecuado. La técnica se usa en casi la totalidad de ensayos manuales, donde el operador realiza el ensayo desplazando manualmente el palpador. Ver Figura 6. Ensayo ultrasónico por contacto.

En la mayoría de los ensayos de contacto con las tuberías, la frecuencia utilizada oscila entre 1MHz y 5MHz.

Figura 6. Ensayo ultrasónico por contacto

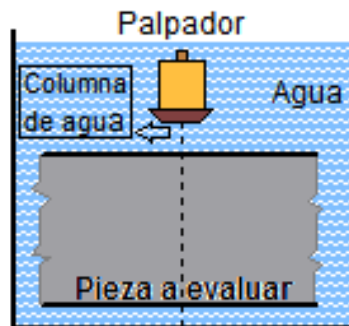


*Fuente: Autores.

2.3.5 Ensayo Ultrasónico Por Inmersión

La inspección con frecuencias superiores a los 10 Mhz se realiza generalmente en la forma de ensayo por inmersión. La parte que se va a inspeccionar se sumerge en un líquido, generalmente agua tratada, y se usa una cantidad controlada y predeterminada de agua como acoplante (ver Figura 7). Esto eliminará cualquier contacto entre la parte a evaluar y el transductor. Una ventaja del ensayo por inmersión es el aumento en la sensibilidad⁴ provista por usar un transductor de frecuencias muy elevadas.

Figura 7. Ensayo por inmersión



*Fuente: Autores

2.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS ULTRASONICAS

El éxito de una inspección por ultrasonido dependerá de cómo el sonido interactúa con el material que se está probando, en este documento, se hará énfasis en la evaluación de tuberías, para esto es importante analizar la frecuencia del ultrasonido a utilizar, ya que interviene directamente en la resolución, sensibilidad y atenuación de las señales obtenidas en las pruebas y por ende en el análisis posterior de estos datos.

Para definir algunas de las propiedades generales de las ondas por ultrasonido se utilizará el ejemplo referido en la Figura 8; que representa la propagación de ondas a lo largo de una cuerda tensada horizontalmente y fija en un punto A. Si se inducen oscilaciones completas en el punto libre B de manera que se desplace a los puntos B' y B'' periódicamente, se generará un tren de ondas que se propaga a lo largo de la cuerda.

⁴ La sensibilidad en este caso es la habilidad para detectar discontinuidades pequeñas.

Figura 8. Tren de ondas

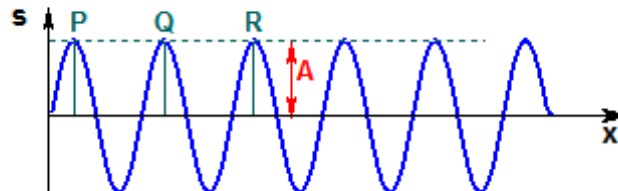


*Fuente: Tomado de [12]

El análisis de figura anterior sugiere algunos parámetros útiles mediante los cuales se pueden definir las ondas de ultrasonido:

2.4.1 Amplitud: En la Figura 9, el eje x represente el tiempo y el eje S el desplazamiento de las ondas, se observa que, en los puntos P, Q y R el desplazamiento desde la posición de equilibrio es máximo. El valor de desplazamiento máximo se denomina amplitud A de la onda.

Figura 9. Amplitud de una onda



*Fuente: Tomado de [12]

2.4.2 Ciclo: Las partículas se desplazan, primero en una dirección y luego en la dirección opuesta. Dos desplazamientos hacen un ciclo completo. (Ver Figura 10).

Figura 10. Ciclo de una onda.

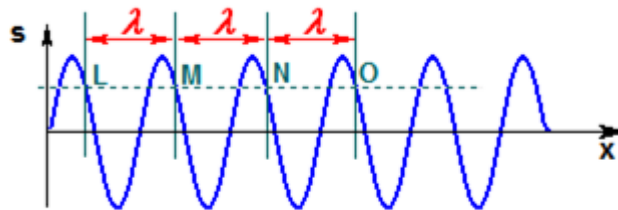


*Fuente: Tomado de [12]

2.4.3 Longitud de onda: En Figura 11. Los puntos L, M, N y O corresponden a aquellos puntos a lo largo de la cuerda que, en un instante dado, están en la misma condición de oscilación (mismo desplazamiento y el mismo sentido del movimiento), por lo que se dice que esos puntos están en coincidencia de fase. La longitud de onda λ es la distancia entre dos puntos consecutivos que están en coincidencia de fase, es decir que es la distancia que la onda avanza al completar un ciclo.

Es importante dejar claro que, no son las partículas las que se mueven a través del material, sino que, la energía vibracional se transfiere de una partícula a otra (a la más cercana).

Figura 11. Longitud de onda



*Fuente: Tomado de [12]

2.4.4 Periodo y Frecuencia: El periodo T es el tiempo requerido por la onda para completar un ciclo. Por lo que, la frecuencia f de una onda puede definirse, respecto a su periodo, como:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

De manera que la frecuencia es el número de ciclos completos por unidad de tiempo; su unidad estándar para es el hertz (Hz) (un hertz equivale a un ciclo por segundo).

Así, si se usa un transductor de 5 MHz para la inspección, significa que las vibraciones de una partícula están ocurriendo a razón de 5 millones de ciclos por segundo.

2.4.5 Velocidad de propagación: La relación que existe entre frecuencia y longitud de onda depende de la velocidad longitudinal del material que se inspecciona. La Velocidad longitudinal es la rapidez con que el sonido viaja a través del material.

Se considera que la velocidad longitudinal es constante para un material dado y solo puede alterarse si se cambia el modo de la energía vibracional. Matemáticamente, se expresa la relación de la siguiente manera:

$$\lambda = V/f \quad (2)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \lambda &= \text{longitud de onda} \\ V &= \text{Velocidad del material} \\ f &= \text{Frecuencia del transductor} \end{aligned}$$

2.4.6 Resolución: En la ecuación anterior la frecuencia es la variable que puede controlarse en la inspección. Esto puede lograrse usando un transductor que genere una frecuencia diferente. A medida que la frecuencia se reduce, la longitud de onda aumenta, dando mayor penetración del material, pero con una pérdida de resolución. La resolución es la habilidad para distinguir indicaciones producidas en un TRC (u otro tipo de dispositivo de visualización para el usuario) por discontinuidades que se encuentran muy cerca una de otra. A mayor frecuencia mejor resolución.

En la Figura 12 se observa en la parte izquierda una resolución pobre, los ecos son anchos y se superponen. La imagen derecha posee una buena resolución, los ecos son angostos y están separados.

Figura 12. Resolución en END por ultrasonido.



Fuente: Autores.

2.4.7 Sensibilidad: La sensibilidad es la habilidad para detectar discontinuidades pequeñas. A medida que la frecuencia aumenta, la longitud de onda disminuye. Proveyendo menos poder de penetración, pero aumentando la resolución y la sensibilidad. El tamaño mínimo para detectar una discontinuidad se considera es un medio de la longitud de onda

$$dmp = \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

dmp = defecto mas pequeño detectable.

2.4.8 Atenuación: la atenuación de la vibración de las partículas dentro del material es otra característica importante del ultrasonido. La atenuación es la disminución de la energía mecánica del haz del sonido al estar pasando por el material. La atenuación aumenta con cosas tales como el tamaño del material o aumentando la distancia que el sonido viaja. Esta condición crea un esparcimiento (divergencia) del haz.

2.4.9 Frecuencia del transductor: La frecuencia del transductor está determinada por el cristal piezoeléctrico. Entre más grueso sea el cristal, la frecuencia es menor (es complicado hacer vibrar el cristal) y viceversa. Las frecuencias exceden muy raramente los 10 MHz en la mayoría de ensayos no destructivos por contacto, porque a medida que la frecuencia aumenta, el espesor del cristal disminuye, haciéndolo demasiado frágil, Sin embargo hay que recordar que a mayor frecuencia mejor resolución es por esto que en muchas aplicaciones no es utilizada la técnica de contacto sino el ensayo no destructivo por inmersión ya que puede superar los 10 MHz.

2.4.10 Reflexión y transmisión del sonido:

La característica de reflexión ultrasónica es la que permite la detección de discontinuidades. A medida que las ondas de ultrasonido avanzan a través de un material, éstas serán reflejadas por cualquier cosa que ofrezca oposición o impedancia a su propagación.

La cantidad de sonido reflejado puede usarse para evaluar el tamaño de reflector (discontinuidad).

El tiempo que tarde el ultrasonido en viajar al reflector y regresar al transductor puede utilizarse para determinar la distancia a éste.

2.4.11 Impedancia acústica:

La unidad usada para considerar la resistencia de un material al paso de ultrasonido es la impedancia acústica específica. Se expresa como el producto de la densidad del material por la velocidad del material.

$$z = \rho * V \quad (4)$$

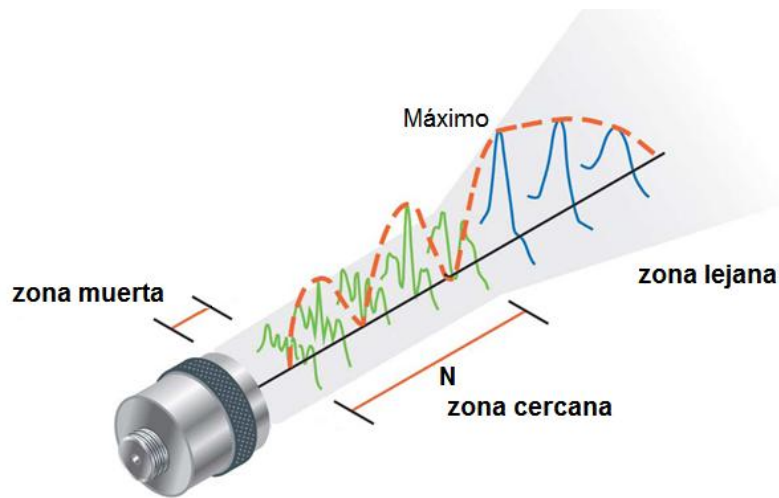
z = Impedancia acústica
 ρ = Densidad del material
V = Velocidad del material

2.4.12 Haz Ultrasónico

Cuando se acopla un transductor a la superficie de un metal a evaluar, se generará un flujo de ondas llamado haz de energía ultrasónica dentro de la pieza. A medida que se propague el ultrasonido, formara tres áreas características que corresponden a (ver Figura 13):

- Zona muerta (*dead zone*)
- La zona cercana o de fresnel (*near zone* o *fresnel zone*)
- La zona lejana o fraunhofer (*far zone*)

Figura 13. Haz ultrasónico

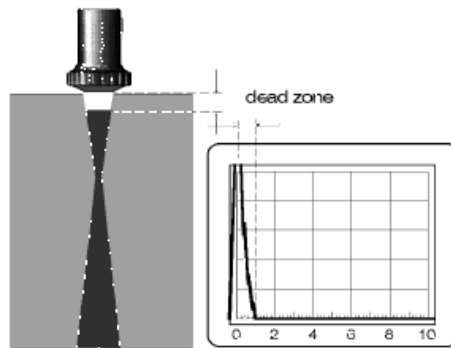


*Fuente: Adaptado de [13]

2.4.12.1 Zona Muerta: La zona muerta es un área directamente debajo de la superficie donde se acopla el transductor (Figura 14); en la cual no es posible tomar un valor de medición. La profundidad de la zona muerta corresponde al tiempo de duración del pulso de excitación al transductor. Esto significa que una porción pequeña del material directamente bajo el transductor no se puede inspeccionar adecuadamente cuando se utiliza un transductor de ángulo recto.

La profundidad de esta zona se estima algunas veces por la posición del eco inicial desplegado en la pantalla, tal como se observa en la siguiente figura.

Figura 14. Zona muerta del haz ultrasónico



Fuente: Tomado de[14]

2.4.12.2 Zona Cercana: la zona cercana del haz ultrasónico se caracteriza por tener áreas de intensidad acústica desiguales y se encuentra directamente después de la zona muerta y se extiende hasta el punto donde las intensidades acústicas convergen uniformemente hasta alcanza su punto máximo.

2.4.12.3 zona lejana: la zona lejana es la porción del haz ultrasónico que se extiende más allá de la zona cercana y continúa hasta que el sonido se atenúa. Esta área tiene una caída en las intensidades de sonido sobre la longitud total debido a las características de atenuación del material que se inspecciona. Esto permite una respuesta de amplitud predecible de una discontinuidad y su profundidad.

2.5 MODOS DE ONDAS ULTRASÓNICAS

La dirección de propagación de una onda ultrasónica y la dirección de vibración de las partículas en el interior del medio son independientes entre sí. Este hecho permite identificar los diferentes tipos de ondas dependiendo del modo de oscilación de las partículas.

Existen cuatro tipos o modos de onda que se pueden utilizar en los ensayos no destructivos por ultrasonido:

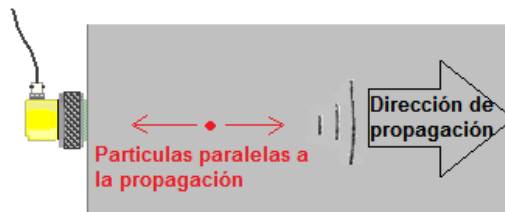
- Ondas longitudinales o de compresión
- Ondas transversales o de corte (*Shear*)
- Ondas Rayleigh o superficiales
- Ondas Lamb o laminares.

Las más utilizadas son las ondas longitudinales y las transversales ya que son las que permiten la propagación del haz en dirección a las discontinuidades.

2.5.1 Ondas longitudinales

En las ondas longitudinales la dirección de vibración de las partículas es paralela a la dirección de la propagación de onda.

Figura 15. Ondas longitudinales



*Fuente: Autores.

Si un transductor se acopla a la tubería de prueba con una incidencia normal tal como se observa en la Figura 15, la onda ultrasónica generada se propagará en Angulo recto con respecto a la superficie del artículo. Este arreglo entre transductor-pieza de prueba causará vibraciones en las partículas en una dirección paralela a la dirección de propagación de la onda.

Las ondas longitudinales se pueden propagar en sólidos, líquidos y gases y permiten utilizarse para la medición de espesores, también se caracterizan por ser de mayor velocidad de propagación que las transversales.

2.5.2 Ondas transversales

En las ondas transversales la dirección de vibración de las partículas es perpendicular al sentido en el que viaja la onda. Las ondas transversales son generadas al acoplar un transductor con un material de prueba a un ángulo diferente al de incidencia normal. Cambiando este ángulo de incidencia, las ondas transversales pueden propagarse a ángulos que no son perpendiculares con la superficie de prueba. Los ángulos comunes más utilizados son de 45°, 60° y 70° (ver Figura 16).

Figura 16. Ondas transversales



*Fuente: Autores.

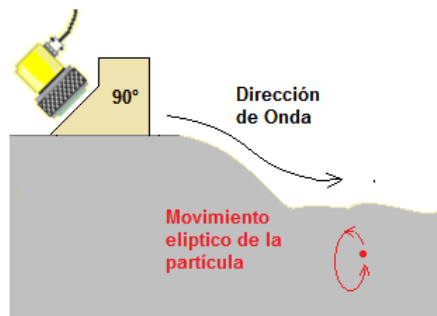
La velocidad de una onda transversal es aproximadamente la mitad de una onda longitudinal, lo que permite que la sensibilidad y la atenuación aumenten. Las ondas transversales se utilizan para detectar discontinuidades que no están orientadas de forma paralela a la superficie de prueba y solo pueden ser utilizadas en elementos sólidos a excepción de líquidos de alta viscosidad.

2.5.3 Ondas superficiales.

Las ondas superficiales se generan cuando se utiliza un ángulo de incidencia excesivo; esto ocasiona que las ondas se propaguen a lo largo de la superficie del artículo de prueba con un movimiento elíptico de la partícula.

Las ondas superficiales o Rayleigh se concentran en la superficie del elemento de prueba, por lo tanto son muy sensibles a las discontinuidades superficiales; sin embargo poseen la limitación de ser fácilmente atenuadas por acoplantes, pintura o suciedad de la superficie del elemento de prueba (ver Figura 17).

Figura 17. Ondas superficiales



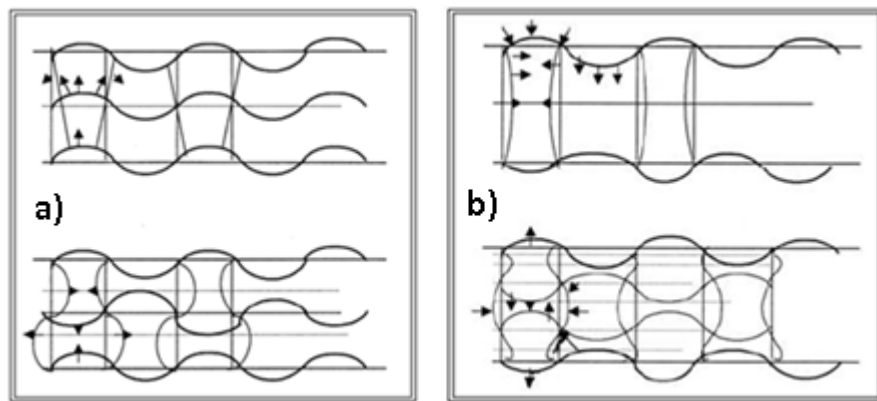
Fuente: Autores.

2.5.4 Ondas Lamb

Las ondas Lamb pueden generarse con un transductor similar en ángulo de incidencia al usado para generar ondas transversales. Se caracterizan por viajar a través de medios que tienen de espesor menos de tres longitudes de onda, por lo tanto la onda se propagará por todo el espesor destacándose su utilización en inspección de láminas y tubos delgados.

Las ondas Lamb están conformadas por ondas longitudinales y transversales mezcladas en zig-zag en las cuales algunas de las partículas oscilan en una dirección de 90° a la superficie y otras en ángulos diferentes. Además, tienen dos componentes: uno simétrico y otro asimétrico, en donde las partículas de la zona central oscilan transversalmente (forma asimétrica) y longitudinalmente (forma simétrica) (ver Figura 18)

Figura 18. Ondas Lamb a) simétrica y b) asimétrica



*Fuente: Tomado de [15]

2.6 PROPAGACIÓN DEL HAZ ULTRASÓNICO A TRAVÉS DE DOS MATERIALES

Cuando un haz ultrasónico alcanza la interfase (separación) entre dos materiales con propiedades acústicas diferentes (impedancia acústica), pueden ocurrir cuatro fenómenos posibles (ver Figura 19):

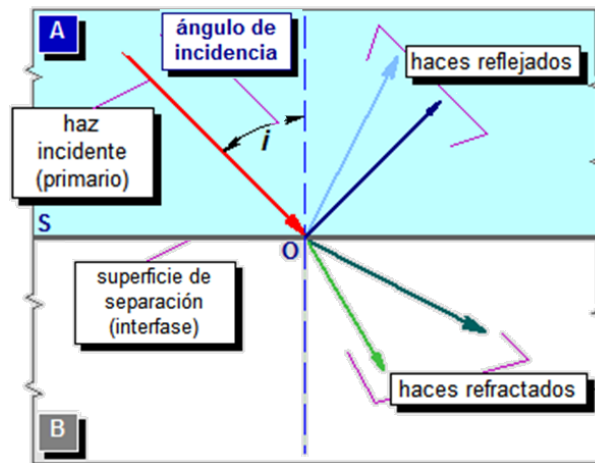
- **Reflexión:** parte del haz cambia de dirección en el mismo material.
- **Transmisión:** parte del haz se transmite al segundo material.
- **Refracción:** el haz transmitido cambia de dirección en el segundo material.
- **Conversión de modo:** parte del haz transmitido se convierte en ondas transversales.

En secciones anteriores se han descrito algunas de estas características, a continuación se define los principios de refracción y conversión de modo de onda presentes en una interfase de materiales.

2.6.1 Refracción de Interfase y Conversión de Modo

El fenómeno de refracción aparece cuando un haz ultrasónico encuentra la superficie **S** de separación entre dos materiales (interfase) formando un determinado ángulo con la perpendicular a la superficie. Este ángulo ***i*** que forman el haz y la normal a la superficie **S** se llama *ángulo de incidencia*.

Figura 19. Ángulo de incidencia



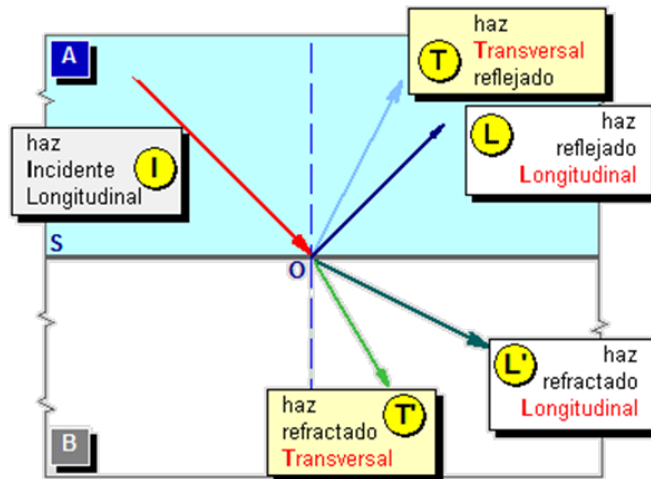
*Fuente: Tomado de [12]

En la figura anterior se observa que, cuando el haz primario que procede de A alcanza el punto de incidencia O, crea 4 haces en cuatro direcciones distintas:

- dos de ellos permanecen en el medio A (rayos reflejados).
- y los otros dos penetran en el medio B (rayos refractados)

La refracción implica no sólo la subdivisión del haz sino también la conversión parcial del modo o del tipo de vibración del haz incidente. En la siguiente figura, se observa que los haces reflejados del haz incidente longitudinal (I), se componen de una vibración longitudinal (L) y de otra vibración transversal (T), experimentando una conversión del modo de vibración respecto del haz incidente. De igual manera ocurre con los haces refractados.

Figura 20. Conversión de Modo del Haz Incidente.



*Fuente: Tomado de [12]

Para determinar la cantidad de reflectividad presente en una interfase, es necesario conocer la impedancia acústica de los materiales es decir, la relación de velocidad longitudinal y densidad de cada material. Por ejemplo, una interfase de acero-aire produce una reflectividad muy elevada. La razón es que el valor de velocidad longitudinal del acero es mucho mayor que la del aire produciendo que el sonido viaje más rápido en el acero.

Si el haz incidente es normal a la interfaz, La siguiente formula es utilizada para determinar cuanta reflectividad es causada por la interfase de materiales:

$$\%R = \frac{(Z_B - Z_A)^2}{(Z_B + Z_A)^2} * 100 \quad (5)$$

Z_A = Impedancia acustica del material A

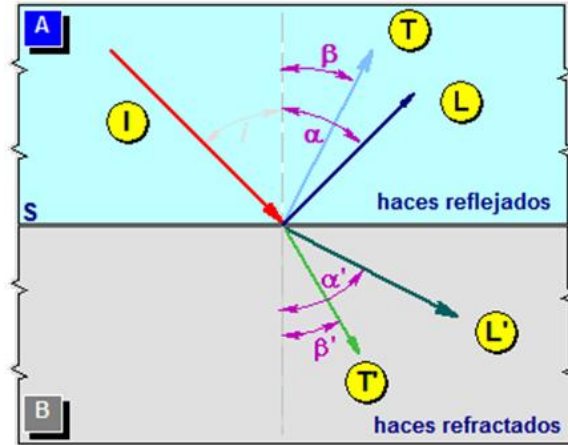
Z_B = Impedancia acustica del material B

$\%R$ = Porcentaje de sonido reflejado

2.6.1.1 Ley de Snell y ángulos críticos:

Una aplicación utilizada para determinar el ángulo incidente o de refracción del ultrasonido es la ley de Snell, para la cual debe cumplirse que $i = \alpha$ (ángulo de incidencia i igual al ángulo de reflexión α)

Figura 21. Ángulos incidentes



*Fuente: Tomado de [12]

Para calcular los ángulos de refracción para ondas longitudinales o transversales la ley de Snell establece:

- Ángulo de refracción para la onda transversal T' :

$$\frac{\sin i}{\sin \beta'} = \frac{V_A}{V_B} \quad (6)$$

- Ángulo de refracción para la onda longitudinal L' :

$$\frac{\sin i}{\sin \alpha'} = \frac{V_A}{V_B} \quad (7)$$

$\sin i$ = Seno del ángulo de incidencia

$\sin \beta'$ = Seno del ángulo de refracción de T'

$\sin \alpha'$ = Seno del ángulo de refracción L'

V_A = velocidad del sonido del material A

V_B = velocidad del sonido del material B

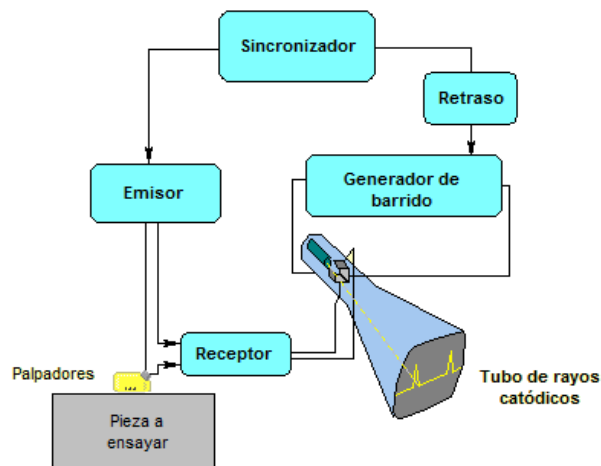
Así mismo de las anteriores ecuaciones se puede establecer el ángulo de incidencia para los transductores en las pruebas no destructivas por ultrasonido según sea el tipo de onda que quiera refractar ya sea superficial o transversal, a estos ángulos de incidencia se les llama ángulos críticos. El primer ángulo crítico es el ángulo de incidencia requerido para refractar una onda longitudinal 90 grados (enviar el haz a la superficie). El segundo ángulo crítico es el ángulo de incidencia requerido para refractar una onda transversal 90° Celsius.

3. EQUIPO ULTRASÓNICO

Un equipo ultrasónico se puede describir como la combinación de componentes electrónicos que proveen una función específica o combinación de funciones que son vitales a la hora de realizar un examen con ultrasonido. Con el avance de la tecnología el equipo de ultrasonido ha sufrido cambios, pero su principio básico de funcionamiento sigue siendo el mismo. Sus principales funciones consisten en proveer los mecanismos necesarios para proporcionar la señal eléctrica que el transductor emisor transforma en ondas de sonido, recibir y amplificar la señal eléctrica del transductor receptor y finalmente presentar en pantalla las dos señales, es decir la emitida y la recibida.

En un equipo de ultrasonido tradicional se identifican cinco etapas básicas; el circuito de reloj (sincronizador), circuito transmisor (emisor) o pulsador, circuito generador del barrido, circuito receptor o amplificador y circuito de tubo de rayos catódicos (TRC⁵). La Figura 22. Muestra un diagrama de los componentes de un equipo ultrasónico tradicional.

Figura 22. Diagrama de bloques de un equipo ultrasónico tradicional



*Fuente: Tomado de [12].

3.1 CIRCUITOS DEL EQUIPO ULTRASÓNICO

3.1.1 Circuito de reloj o sincronizador. Emite pulsos a una determinada frecuencia que sirven de tiempo base para los demás circuitos dentro del instrumento, y además, provee energía eléctrica tanto para el transmisor

⁵ TRC: Tubo de Rayos Catódicos

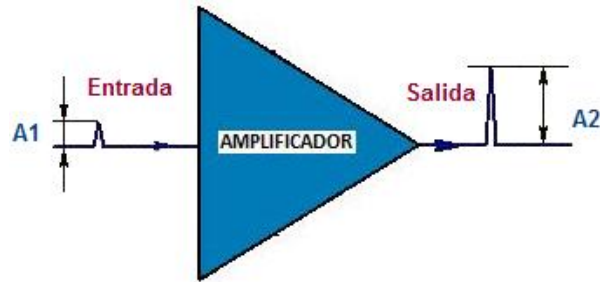
(emisor) como para el generador de barrido. La frecuencia también conocida como tasa de repetición, corresponde al número de pulsos en una unidad de tiempo, y varía de acuerdo al control de frecuencia de repetición de pulsos.

3.1.2 Circuito transmisor (emisor). Cuando el transmisor recibe el pulso del sincronizador, envía un pulso de alto voltaje (aprox. 600 voltios) de corta duración al elemento piezoeléctrico (cristal) en el transductor y por otro lado al receptor. El transductor al ser excitado se deforma y posteriormente vuelve a su posición de reposo con oscilaciones libres amortiguadas, estas oscilaciones a su vez generan un grupo de ondas ultrasónicas en el medio acoplado al palpador. Este medio acoplado se conoce como "acoplante", y es un material que favorece la transmisión de las ondas ultrasónicas generadas por el palpador al material que se esté inspeccionando.

3.1.3 Circuito generador de barrido. Éste circuito envía un voltaje al tubo de rayos catódicos, el cual, causa el pulso inicial y la imagen de barrido. El voltaje enviado es una señal diente de sierra de voltaje, que al aplicarlo a las placas horizontales del TRC, desvía el haz de electrones de izquierda a derecha a velocidad constante definiendo así el eje de tiempos. El comienzo del pulso inicial se conoce como cero eléctrico y se distingue del cero acústico, ya que se tiene un retraso de tiempo entre el desplegado del pulso inicial y la entrada del ultrasonido a la pieza a ensayar; Este retraso también es conocido como tiempo de retardo entre el cero eléctrico y el cero acústico. Una manera de compensar el retardo en el tiempo con el que el haz penetra la pieza, es retardando el barrido respecto del tiempo de transmisión. Este ajuste de retardo afecta la posición de la señal que se visualiza en pantalla, pero no su forma. (Ver linealidad horizontal en Calibración del equipo ultrasónico)

3.1.4 Circuito receptor. En él se encuentra un amplificador que consta de una serie de atenuadores los cuales ajustan el nivel de amplificación; además, posee un circuito detector que rectifica e integra las señales amplificadas. Las señales que entran secuencialmente en el receptor corresponden al pulso que es enviado por el transmisor y al pulso suministrado por el transductor en la recepción (voltaje relativamente bajo creado en el momento que el elemento piezoeléctrico en el transductor convierte la energía mecánica recibida a energía eléctrica), estas señales son procesadas, es decir, son amplificadas, filtradas y rectificadas y luego enviadas a las placas de deflexión vertical del TRC para desplegar la señal en pantalla; es así como se origina la primera indicación o eco de fondo.

Figura 23. Circuito de Amplificación



*Fuente: Tomado de [12].

Para comprender el proceso de amplificación realizado en el receptor, se puede considerar una señal de entrada con una determinada amplitud A_1 que es recibida por el circuito de amplificación, y una señal de salida con una amplitud A_2 emitida por el mismo (Figura 23). Donde el cociente entre las amplitudes de las señales de entrada y salida (A_2/A_1) se conoce como el nivel de amplificación y se expresa en decibelios (dB). La Tabla 2, muestra la relación A_2/A_1 , expresada en dB, donde al aumentar (o reducir) la amplificación en decibeles dada en la columna de la derecha, la relación de amplitudes de la señal de salida aumenta (o disminuye) con los coeficientes dados en la columna de la izquierda.

Tabla 2. Niveles de amplificación

Relaciones expresadas en decibelios (dB)	
A_2/A_1	dB
1,0	0
1,26	2
1,585	4
2,0	6
2,51	8
3,16	10
5,62	15
10	20
17,8	25
31,6	30
56	35
100	40

*Fuente: Tomada de [12]

El nivel de amplificación de la señal se ajusta mediante los atenuadores, y usualmente hay tres tipos de atenuadores calibrados en dB:

- Un atenuador calibrado de manera vasta con pasos de 20 decibelios (0-20-40-60 decibelios).
- Un atenuador calibrado con más precisión con 20 pasos de 2 decibelios cada uno (total 40 decibelios).
- Un atenuador no calibrado para ajustes continuos más finos de 0 a 6 decibelios. [12]

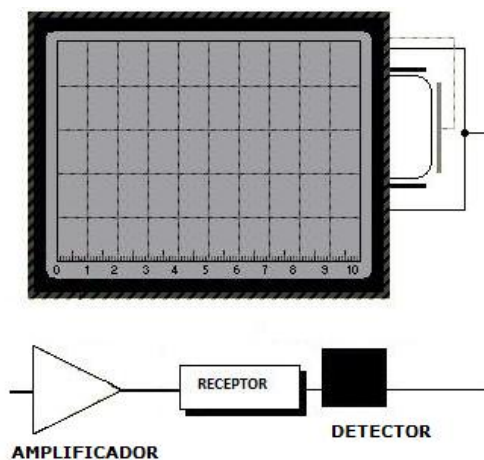
El decibel está definido como:

$$dB = 20 \log_{10}(A_2/A_1) \quad (8)$$

Donde, A_1 representa la amplitud de la primera señal, y A_2 la amplitud de la segunda.

Como se mencionó anteriormente, la etapa de recepción cuenta también con un circuito detector; (Figura 24). Ya que la señal después de la etapa de amplificación aún tiene la forma alterna original, y por tanto no es conveniente su presentación directa en la pantalla, pues sería difícil evaluar la amplitud de las señales y los intervalos de tiempo entre ellas. De este modo, el circuito detector ubicado a la salida del receptor rectifica las señales alternas (solo muestra sus componentes positivas y negativas) y las integra, uniendo sus nodos (por medio de condensadores) con el fin de evitar los errores que se puedan presentar por su forma no afilada. Así, la señal representada en el TRC corresponde a la envolvente de la señal alterna y es proporcional a la presión acústica de las ondas que inciden en los transductores.

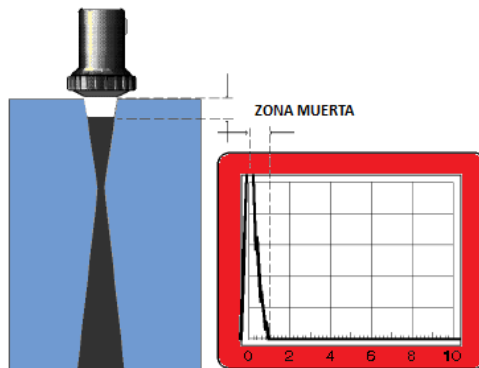
Figura 24. Circuito Receptor o Amplificador



*Fuente: Basado en [12].

Otra característica que presenta el receptor, es que éste no comenzará a recibir señales, hasta que el pulso de emisión se haya terminado. Es decir, que existe un corto tiempo entre la emisión y el comienzo de la recepción. Debido a esto, discontinuidades que se encuentren cerca de la superficie de la pieza que se inspecciona podrían no ser detectadas durante éste tiempo. Este hecho se conoce como zona muerta (Ver Figura 25), la cual corresponde a la longitud expresada en milímetros, de la porción de la línea base de tiempos que alcanza el pulso de salida donde las discontinuidades reflejadas del material inspeccionado no se pueden detectar.

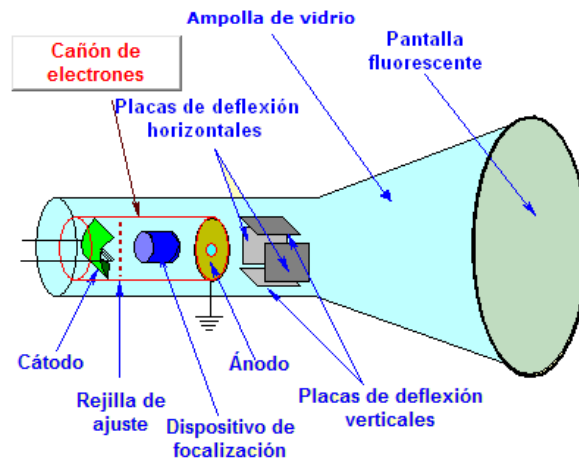
Figura 25. Zona muerta del haz ultrasónico



*Fuente: Basado en [16]

3.1.5 Tubo de rayos catódicos. En la Figura 26, se observan cada uno de los elementos que lo componen; su principal componente es una ampolla de vidrio con alto vacío que contiene: un cátodo, una rejilla de ajustes, un dispositivo de focalización, un ánodo (anillo circular), placas de deflexión horizontal y vertical y una pantalla visual recubierta con un fosforescente. Donde el cátodo, la rejilla de ajuste, el dispositivo de focalización y el ánodo conforman lo que se conoce como cañón de electrones.

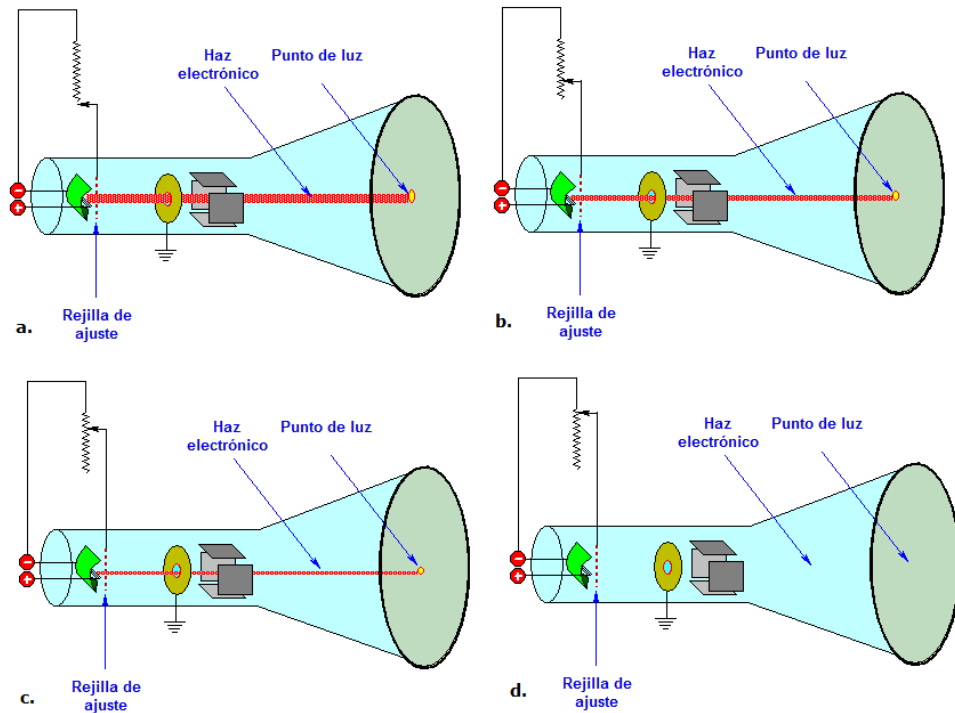
Figura 26. Componentes del tubo de rayos catódicos – TRC



*Fuente: Tomada de [12].

El cátodo (cargado negativamente) libera electrones que se dirigen al ánodo (positivo) por el campo eléctrico que se crea entre estos dos elementos. Los electrones pasan a través del ánodo y se aceleran por el campo eléctrico entre él y la pantalla fluorescente. Cuando esta corriente de electrones choca sobre la pantalla, ésta es iluminada, de modo que donde el haz luminoso encuentra la pantalla se produce un punto de luz. Es posible modificar la luminosidad de este punto en la pantalla, realizando un ajuste en la intensidad del haz y en la rejilla de ajuste. En caso de presentarse potenciales que sean suficientemente negativos respecto del cátodo, pueden anular totalmente el haz de electrones. En la Figura 27 (a), se observa la máxima amplitud del haz de electrones y como se modifica (reduce) al ajustar la rejilla a potenciales negativos (Figura 27 b y c) hasta el punto de desaparecerse (Figura 27 d). Por su parte, la pantalla de focalización permite enfocar el haz de manera que converja en un área casi puntual de la pantalla. Y a su vez, las placas de deflexión horizontal y vertical dirigen el haz de electrones y por consiguiente hacen que el punto de luz de se mueva horizontal y vertical respectivamente a través de la pantalla.

Figura 27. Ajuste en la intensidad del haz de electrones



a. Máxima amplitud del haz de electrones; b y c. Ajuste de la rejilla a potenciales negativos; d. Anulación del haz de electrones

*Fuente: Basada en [12].

En los equipos modernos, ya no es común hablar de tubo de rayos catódicos, pues se encuentran otros tipos de pantallas, como las de cristal líquido.

El equipo ultrasónico puede ser estacionario o de tipo portátil. El estacionario generalmente se encuentra en plantas de fabricación, donde las partes son llevadas a dicha estación de inspección para realizar el proceso rutinario. Puede ser realizado a través de sistemas automatizados, en los cuales el palpador es manipulado mediante aditamentos mecánicos movidos por un motor; y la pieza inspeccionada es aceptada o rechazada automáticamente, de acuerdo a la calibración del sistema que se tiene preestablecido. El equipo portátil permite inspeccionar aquellas piezas que no se pueden mover fácilmente, y por tanto es necesario llevar el equipo hasta el sitio donde se requiere realizar la inspección. En este caso, es un operador quien manipula el palpador y quien acepte o rechace la pieza inspeccionada basándose en la interpretación de la gráfica generada en el TRC.[12][1]

3.2 CONTROLES DEL EQUIPO ULTRASÓNICO ESTANDAR

Un equipo ultrasónico cuenta con una serie de controles (ver Figura 28). Los cuales están relacionados con los circuitos antes mencionados, de manera, que proveen una función específica. En la Tabla 3. Se detalla cada uno de estos controles y sus principales características. Muchos de estos controles son utilizados durante la calibración del equipo ultrasónico. Esta información se amplía en la unidad relacionada con la calibración del equipo ultrasónico.

Figura 28. Equipo ultrasónico



*Fuente: Tomado de

Tabla 3. Controles del equipo ultrasónico y principales características

Nombre del control	del	Características
Frecuencia de repetición de pulsos	de	Permite modificar el tiempo entre los pulsos transmitidos. Es necesario un tiempo prudente entre los pulsos para permitir al ultrasonido viajar a través del material que se inspecciona. Se pueden encontrar en diferentes formas: fijos, variables mediante "switches", o variables mediante el control de rango del material.
Energía del pulso		Algunos equipos presentan este control que permite cambiar el voltaje aplicado al elemento piezoeléctrico. Este voltaje se puede variar de entre 200 V a más de 1200 V, y este valor depende de la capacidad del instrumento. Además, se tiene que para voltajes más elevados se tendrá mayor penetración en el material.
Sintonización del pulso (Pulse tuning)	del	Sirve para igualar la salida (output) del transmisor a la frecuencia resonante del transmisor, de modo que provee una conversión de energía máxima entre el transmisor y el transductor.
Controles "Damping" (Duración de pulso)	de	Es muy común encontrar este control en el instrumento. Este permite cambiar la duración del pulso que se aplica al elemento piezoeléctrico, de manera que cuando se incremente "damping" decrecerá el efecto retumbante (vibración después de eliminado el

	pulso) del transductor. De esta manera se aumenta la resolución cerca a la superficie y disminuye la profundidad de penetración en el material.
Control calibrado de ganancia (Gain)	Este control afecta las amplificaciones de la señal de salida del receptor y ofrece ajustes calibrados para la amplitud de la indicación, de manera que no genera aumento o disminución en la intensidad del ultrasonido en la pieza examinada. El ajuste se realiza en incrementos escalonados de dB's, generalmente uno en la forma de control fino y otro grueso. El grueso corresponde a incrementos de 20dB y el fino a incrementos de 2 dB. Adicionalmente, algunos instrumentos contarán con un control de ganancia calibrado para ajustes precisos de amplitud para indicaciones producidas por un reflector. Otros instrumentos usan una serie de "switches" atenuadores para esta misma función.
Control de rechazo (Reject)	Se suministra en el circuito receptor y permite eliminar señales no deseadas de baja amplitud conocidas como trazo de hierbas, las cuales pueden ser producidas por cosas como sonido reflejado a causa de materiales con estructura de grano grueso, y que pueden crear confusiones en el momento de interpretar una señal. Su funcionamiento consta de restar un valor constante en altura a todas las señales, de manera que este valor equivale a una altura mínima que debe tener la señal para ser presentada en la pantalla. Cualquier señal que este tenga una amplitud igual o por debajo de este valor se anula y las demás que lo superen serán las representadas, pero con una amplitud reducida en este valor. Este control debe ser usado con precaución para no afectar la linealidad vertical del instrumento.
Ancho de Banda (Band Width)	El ancho de banda equivale al rango de frecuencias que un instrumento puede recibir y sintonizar. Cuando un instrumento recibe una frecuencia específica se considera de banda angosta, en caso de ser capaz de recibir un rango amplio de frecuencias es llamado de banda-ancha. Generalmente se selecciona el ancho de banda del instrumento dependiendo del material a inspeccionar y la sensibilidad que se requiera.
Corrección de Amplitud-Distancia (DAC)	En un examen con ultrasonido, las discontinuidades iguales pero que se encuentran a diferentes distancias del palpador, generan ecos de amplitud que disminuyen a medida que esta distancia se hace mayor. Esto es debido a la divergencia del haz y a la atenuación de la presión acústica en el material a inspeccionar. Para corregir este inconveniente, existe éste control que hace parte del circuito receptor, el cual, permite que en este circuito se ajuste el nivel de amplificación de acuerdo a la distancia recorrida por el haz. De esta manera producirá indicaciones constantes para discontinuidades de igual tamaño, pero ubicadas a distancias diferentes.

Intensidad/Focalizar	Permite rectificar la señal de radiofrecuencia, es decir, las señales que van después de la amplificación y antes de pasar la filtración y la reflexión. Ya que desplegar estas señales en el TRC conllevaría a complicaciones en el momento de analizarlas, pues los dos componentes del voltaje positivo y negativo serían presentados. Por tanto, al realizar la rectificación en el circuito amplificador del video antes de ser desplegadas, facilitará su interpretación. Estos controles de despliegado incluyen el de focalizar (focus), intensidad y movimiento de barrido horizontal y vertical.
Control de "Delay" (Retraso)	Este control junto con el control de rango, son esenciales para la calibración del barrido, y hacen parte del circuito generador de barrido. El control "delay" mueve la imagen desplegada uniformemente a lo largo (horizontalmente) de la pantalla, de manera que se puede posicionar las indicaciones de los reflectores en los lugares deseados en el barrido.
Control de Rango	Provee la expansión y compresión necesarias del barrido, las cuales son necesarias para la compensación y calibración a una velocidad específica y un determinado espesor de un material.
Control de las compuertas (Gates)	Algunos instrumentos cuentan con controles para las compuertas electrónicas. Estos controles se utilizan para monitorear una sección específica del barrido, donde se programa un nivel umbral dentro de la zona de referencia, que al ser sobrepasado por una discontinuidad, la alarma avisará indicando de esta manera que se ha presentado una discontinuidad en los límites de aceptación. Esta alarma puede ser audible o visible.

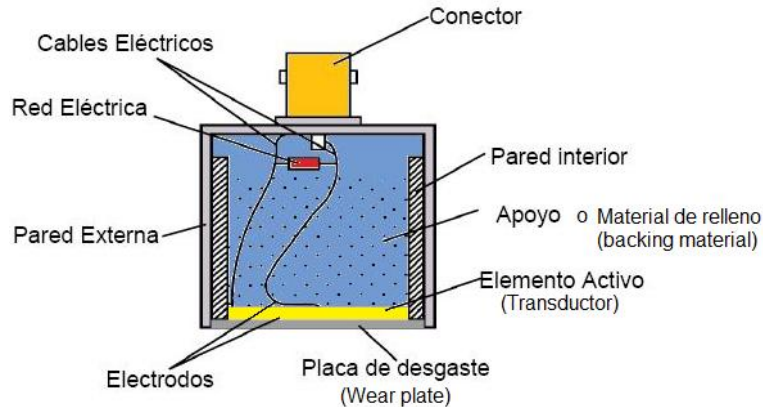
*Fuente: Adaptado de [12][1]

Como se observa en la Tabla 3. Estos controles permiten realizar determinados ajustes, pero cualquier ajuste o control de frecuencia realizado en cualquier circuito del instrumento no cambiará la frecuencia del transductor, solo igualará electrónicamente el transductor al instrumento. De manera que para que pueda existir un cambio en la frecuencia del transductor se debe cambiar el transductor por uno que tenga un elemento piezoeléctrico de diferente espesor.[12][1]

3.3 PALPADORES

Un palpador es un mecanismo constituido por un elemento activo denominado transductor, el cual permite la conversión de oscilaciones eléctricas a vibraciones mecánicas (ondas sonoras) cuando se comporta como transmisor, y de manera inversa cuando lo hace como receptor. Además de este elemento activo, el palpador está compuesto por un respaldo o apoyo y una placa de desgaste (wear plate), los cuales se aprecian en la Figura 29.

Figura 29. Elementos de un palpador



*Fuente: Adaptado de [17]

El respaldo también conocido como material de relleno (backing material), permite controlar la vibración del palpador absorbiendo la energía que irradia el elemento activo por su parte posterior, de modo que se regula la energía vibratoria que éste produce al ser excitado mediante un voltaje eléctrico. El hecho de controlar este efecto es muy importante cuando se aplica la técnica pulso eco, ya que en este caso el transductor también se comporta como receptor. En el capítulo 5. Se amplía sobre la técnica impulso-eco.

Por su lado, la placa de desgaste le ofrece protección del medio permitiendo aumentar su duración y resistencia a la corrosión. Generalmente esta placa de desgaste está hecha de aluminio o un material sintético vidrioso y proveerá una superficie de desgaste a los transductores empleados en los ensayos por contacto, mientras que en los transductores de inmersión donde existe contacto limitado entre el transductor y la pieza a inspeccionar, ésta placa está fabricada en un material plástico (epoxy) (Ver tipos palpadores).

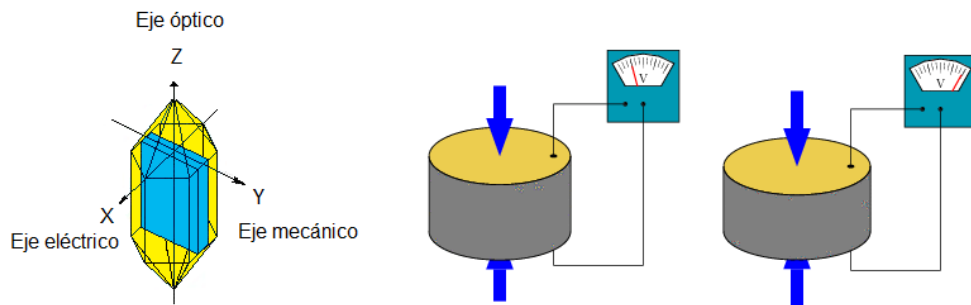
3.3.1 Clasificación del Transductor. Un transductor se puede clasificar como: piezoeléctrico, electrostrictivo, EMAT⁶, láser o aéreos dependiendo del principio físico en el cual se basa.

3.3.1.1 Transductor piezoeléctrico. Consta de un material que se destaca por su piezoelectricidad. El primer material natural piezoeléctrico que se descubrió fue el cuarzo, y al hablar de propiedad piezoeléctrica de este material, se refiere a la capacidad que tiene de presentar cambios en sus cargas positivas y negativas al aplicar algún esfuerzo sobre él, lo cual se conoce como efecto piezoeléctrico directo. Cuando se aplica un voltaje entre las superficies opuestas del material, se obtiene una deformación mecánica

⁶ EMAT: Electromagnetic Acoustic Transducer

(expansión o contracción dependiendo del signo del voltaje) del cristal, y a esto se le llama efecto piezoeléctrico inverso (Figura 30). De esta manera, el transductor actuará como transmisor y emisor a causa de este efecto.

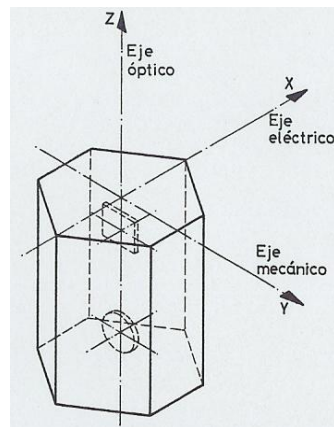
Figura 30. Izquierda Cristal de cuarzo, Derecha: Efecto piezoeléctrico



*Fuente: Adaptado de [12][18]

Para el uso de los cristales de cuarzo en el transductor se emplean dos tipos de corte en uno de los dos planos del cristal, es decir, corte-X o corte-Y (Figura 31). Donde los cristales con corte-X proveerán un modo longitudinal y los corte-Y un modo transversal. En general, todo cristal cortado en la dirección apropiada para generar ondas longitudinales puede considerarse como un excelente emisor de ondas ultrasónicas.

Figura 31. Cristal de cuarzo corte en X

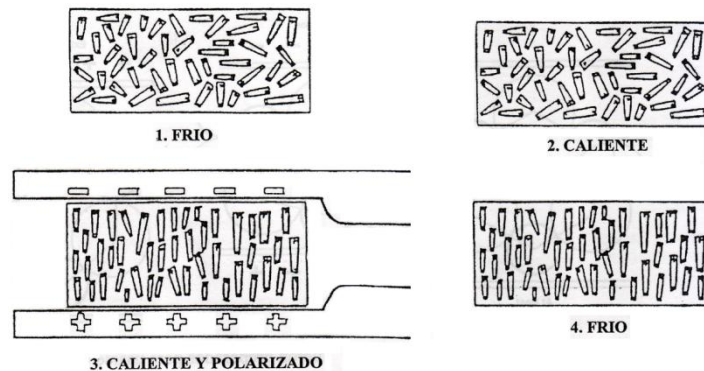


*Fuente: Tomado de [19]

Otro material que es empleado en la construcción de transductores ultrasónicos, es el Sulfato de Litio, el cual es considerado un material piezoeléctrico natural al igual que el cuarzo. Dentro de sus características se encuentra que es bastante soluble en agua y ligeramente susceptible a envejecer, además de ser buen receptor ultrasónico.

3.3.1.2 Transductor electrostrictivo. Está compuesto por un material ferroeléctrico. Generalmente a estos tipos de materiales se les conocen como cerámicas polarizadas, ya que sus propiedades mecánicas se parecen a las de un material cerámico. Los materiales ferroeléctrico en su estado natural no presentan polarización debido a que sus átomos con cargas positiva y negativa están dispuestos en una orientación al azar. Para alinearlas, y así obtener un comportamiento similar al efecto piezoeléctrico se deben someter estos materiales a calentamiento hasta su temperatura de curie y además aplicar un campo eléctrico. De esta manera, manteniendo este campo eléctrico en el material hasta que la temperatura descienda, se mantendrán las cargas alineadas y se conseguirá un efecto piezoeléctrico. En la Figura 32 se aprecia la disposición de las moléculas.

Figura 32. Representación esquemática del proceso de polarización por cerámicas piezoeléctricas.



*Fuente: Tomado de [1].

La temperatura de curie corresponde a la temperatura donde una vez sobrepasada, el material pierde sus propiedades. Actualmente, el material ferroeléctrico es el más empleado a la hora de fabricar transductores ultrasónicos, ya que es un material muy eficiente al convertir energía eléctrica en energía ultrasónica.

Los elementos ferroeléctrico más comúnmente utilizados son el Titanato de Bario y el Zirconato de plomo. Los cuales se caracterizan por ser buenos transmisores del ultrasonido, aunque no son buenos receptos al ser comparados con el cuarzo. Y además, son insolubles en agua y son susceptibles a envejecer rápido. En la Tabla 4 se describen algunas características generales de los materiales utilizados para la construcción de transductores.

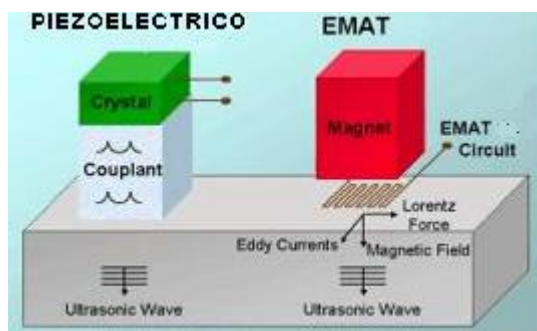
Tabla 4. Características de los materiales usados en la construcción de transductores en los palpadores

Material	Eficiencia como transmisor	Eficiencia como receptor	Sensibilidad	Poder de resolución	Características mecánicas	Temperatura punto de de curie
Cuarzo	Mala	Mediana	Escasa	Optima	Buena	575 °C
Sulfato de litio	Mediana	Buena	Buena	Optima	Soluble en agua	75 °C
Titanato de bario	Buena	Mediana	Optima	Mediana	Frágil	115 - 150 °C
Zirconato titanato de plomo	Buena	Mediana	Optima	Mediana	Buena	550°C

*Fuente: Adaptado de [20]

3.3.1.3 Transductor EMAT. El principio básico de funcionamiento de este transductor, consiste en hacer pasar una corriente pulsante a determinada frecuencia por una bobina que está ubicada cerca de la superficie de un objeto conductor eléctricamente, con lo cual se inducen corrientes parasitas cerca de la superficie de este objeto. Al tiempo que se le aplica un campo magnético estático de manera que las corrientes parasitas experimenten las fuerzas de Lorentz (fuerza ejercida por el campo electromagnético que recibe una partícula cargada o una corriente eléctrica.). Estas fuerzas generarán una deformación pulsante en el material, lo que corresponde a generar ondas de sonido en éste. En la Figura 33 se muestra un ejemplo este tipo de transductor en comparación con uno piezoeléctrico.

Figura 33. Comparación entre un transductor piezoeléctrico y uno EMAT



*Fuente: Tomado de [21]

Dentro de las características que destacan este transductor, se tiene que no se requiere contacto con la superficie y por tanto un acoplante para producir las vibraciones ultrasónicas en el material. Además, aspectos como la rugosidad o la temperatura del material no afectan la transmisión del sonido. Se pueden

producir ondas longitudinales y transversales en el material a inspeccionar dependiendo del arreglo de la bobina y el imán que se tenga.

Algunas de las desventajas que presenta este transductor, es que está limitado a la detección de defectos en metales y debido a que la señal es muy débil se requieren amplificadores con mucha ganancia.

3.3.1.4 Transductor aéreo. Este tipo de transductores presentan la misma ventaja que los EMAT de no requerir contacto ni acoplante para transmitir el sonido a la pieza o material a inspeccionar. Además, al hablar de la reflexión del sonido se conoce que es alta cuando se trata de interfases de aire-metal o aire- metal compuesto. Esto se presenta porque existe una gran diferencia de impedancias acústicas y solo se estaría transmitiendo al material inspeccionado un 1% de toda la energía que se produce.

Para garantizar la eficiencia de este transductor, se recomienda solo operarlo hasta frecuencias máximas de 1 MHz. Por esta razón, este transductor opera con bastante potencia para aprovechar al máximo el efecto piezoeléctrico, y además cuenta con dispositivos eléctricos que le permiten incrementar su resonancia. Siempre se emplea con doble transductor para reducir a la mitad la distancia recorrida por el sonido y aumentar la relación señal-ruido al doble.

3.3.1.5 Transductor Láser. Corresponde a los transductores empleados en las técnicas sin contacto, donde estos se pueden ubicar a metros de separación del material. Su principio se basa en emplear un laser pulsante de considerada potencia como transmisor. Cuando este haz del laser golpea la pared de la pieza a inspeccionar, produce un aumento de la temperatura localmente. De esta manera, al incrementarse la temperatura se produce una deformación pulsante y elástica en el material, es decir se genera sonido. Este sonido transmitido al material posee la misma frecuencia del laser pulsante.

El circuito receptor está conformado por un interferómetro de Láser también, que puede observar la amplitud y frecuencia de las diminutas deformaciones del material con la propagación del sonido.

Algunas de las desventajas que presenta son; que se debe tener precaución para no calentar en exceso el material a inspeccionar y que maneja una relación señal ruido (SNR⁷) baja.

3.3.2 Capacidad o características de un palpador. La capacidad de un palpador está expresada en términos de la sensibilidad y la resolución que éste posea.

⁷ SNR: Signal to noise ratio (relación señal ruido)

3.3.2.1 Sensibilidad. Está relacionada con la capacidad de detectar discontinuidades de tamaños pequeños, y es medida por la amplitud de la respuesta obtenida ante una discontinuidad artificial en un bloque patrón. (Ver bloques de calibración).

3.3.2.1 Resolución. Se refiere a la capacidad que el palpador posee para diferenciar reflexiones procedentes de dos discontinuidades. Al tener una mayor frecuencia se tendrá mejor resolución.

La frecuencia de un palpador se expresa en función del cristal de manera que entre mayor sea su espesor, menor será su frecuencia (requiere un mayor esfuerzo para hacerlo vibrar) y viceversa; de modo que, a medida que aumenta la frecuencia el cristal se hace más delgado, y por tanto se hace más frágil. Debido a esto, es común que en los ensayos por contacto directo no se superen los 10MHz.

3.3.3 Tipos de palpadores. Los palpadores se clasifican de acuerdo al propósito en que van a servir. Por tanto se distinguen; Palpadores de contacto directo, palpadores de inmersión y palpadores de escobilla (paintbrush).

3.3.3.1 Palpadores por contacto directo. A este grupo pertenecen los palpadores que se colocan directamente y con cierta presión sobre la superficie de la pieza a examinar, los cuales requieren además de un medio de acople; el cual se conoce como acoplante.

Dependiendo de la dirección de propagación del haz con respecto a la superficie de la muestra, estos tipos de palpadores se clasifican a su vez en: Palpadores de haz normal y Palpadores de haz angulado.

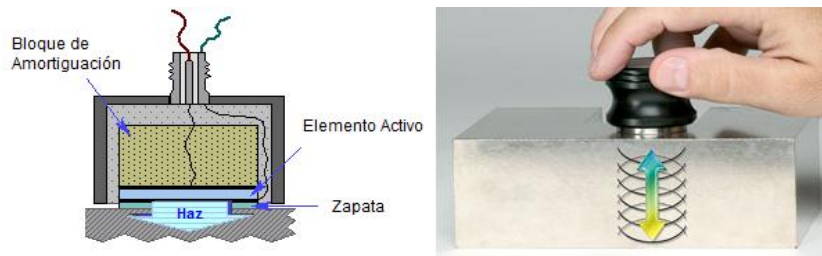
- **Palpadores de haz normal:** Son empleados en los ensayos por pulso-eco y por resonancia, permiten identificar problemas de defectología y caracterización. Estos palpadores, generan un haz perpendicular a la superficie de incidencia de la pieza a inspeccionar y pueden incorporar bloques (zapata) de Lucita (Plexiglás) para retardo, que se acoplan al transductor. La Lucita sirve para incrementar la resolución cerca de la superficie, de manera que la zona muerta del haz ultrasónico quedará en el bloque y no en el material que se inspecciona. Estos bloques también pueden ser fabricados en elementos resistentes al calor, por lo cual se podrían utilizar en materiales que presenten altas temperaturas. Se requiere del uso de un acoplante adecuado entre el bloque y el transductor, de manera que existen acoplantes resistentes al calor para ensayos a temperaturas elevadas.

El diámetro de estos transductores puede variar de 4mm a 30mm y las frecuencias más habituales van de 1MHz a 5 MHz. Emiten ondas de tipo longitudinal, debido a que incorporan osciladores (cristales) diseñados

para esto. Pueden ser fabricados con un número específico de cristales, de acuerdo a lo cual, se consideran los siguientes tipos: Palpadores de cristal único (emisor-receptor), palpadores de doble cristal (uno emisor y otro receptor) y palpadores diseñados para ensayos a temperaturas elevadas.

- **Palpadores de cristal único (emisor-receptor):** Poseen todas las características descritas anteriormente, pero su particularidad hace referencia a la existencia de un solo cristal en el palpador. En la figura se observa todos los componentes de este tipo de palpador.

Figura 34. Palpador de cristal único

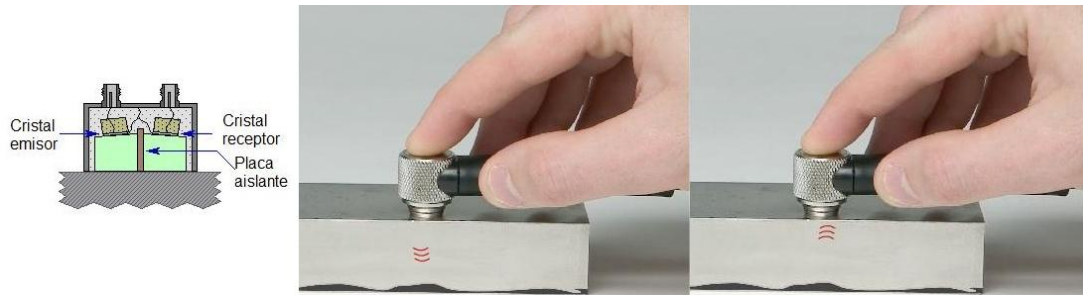


*Fuente: Tomado de [12],[22]

- **Palpadores de doble cristal (uno emisor y otro receptor):** Constan de dos elementos separados para transmitir y para recibir, de modo que se aumenta la resolución cerca de la superficie y se elimina casi por completo el problema de la zona muerta.

Cada uno de los transductores (transmisor y receptor) está acoplado a una cuña de plexiglás donde una placa los mantiene aislados eléctrica y acústicamente. De esta manera, el receptor tiene la habilidad de recibir continuamente, incluso cuando el transmisor esté siendo pulsado. Los cristales están dispuestos con cierta inclinación de manera que generan un efecto focalizado y crean un trayecto de sonido en forma de "V" dentro del material de prueba (Figura 35). Este efecto mejora la resolución en la zona focal.

Figura 35. Palpador doble cristal



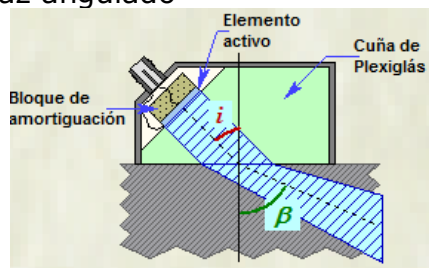
*Fuente: Tomado de [12][22]

Este tipo de palpadores está diseñado para ser usado en un rango de espesor específico de material, por lo cual, si es usado en otro espesor se limitará su efectividad.

- **Palpadores para ensayos a altas temperaturas:** Este tipo de palpadores soluciona el problema que presentan los palpadores convencionales, los cuales no pueden operar a temperaturas fuera del rango comprendido entre -20°C y $+80^{\circ}\text{C}$. Esto se debe a que los adhesivos convencionales que se utilizan para la unión del cristal al amortiguador, pueden dañarse y el beneficio que este último ofrece puede anularse por completo. Adicionalmente, la alta temperatura puede afectar al mismo cristal y especialmente si es de sulfato de litio o de titanato de bario, los cuales tienen puntos de curie de 75° y 115°C - 150°C respectivamente. Es por esto que para ensayos donde se manejan altas temperaturas, es preciso que el cristal sea cuarzo o metaniobato de plomo, los cuales tienen puntos de curie de 500°C , y que como amortiguador y adhesivo se utilizan resinas de moldeo, las cuales soportan temperaturas de hasta 350°C .

Palpadores de haz angulado: Se pueden fabricar de 2 maneras, es decir el bloque de lucita puede ser parte integral del transductor o puede ser desarmable como el descrito en los transductores de haz normal. Si es de este último tipo, se debe asegurar la transmisión del ultrasonido a través de la interfase entre el transductor y la lucita manteniendo el acoplamiento entre éste y el bloque.

Figura 36. Palpador de haz angulado



*Fuente: Tomado de [12].

Los bloques son construidos geoméricamente para proveer dos funciones:

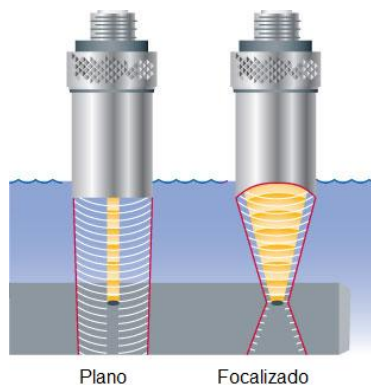
- ✓ El bloque es cortado a un ángulo para dar una orientación específica de la onda transversal en la parte que se inspecciona.
- ✓ Están formados de tal manera que el ultrasonido reflejado en la interfase de lucita y el material sea atenuado en la misma lucita, y así previene el ruido en el barrido del TRC. Es común, que estos bloques presenten cortes serrados en la superficie externa para ayudar en la atenuación del ultrasonido de reflectores internos.

Este tipo de palpadores manejan frecuencias de 2 a 5 MHz, y pueden ser particularmente pequeños para la realización de ensayos en áreas donde la superficie de acoplamiento es pequeña. Se utilizan preferentemente en los equipos pulso-eco y ocasionalmente por transmisión, además se aplican casi únicamente a problemas de defectología.

3.3.3.2 Palpadores de inmersión. Este tipo de palpadores son diseñados para operar bajo un medio líquido y todas sus conexiones eléctricas son fabricadas a prueba de agua mediante empaques de hule. El ensayo puede ser realizado sumergiendo la muestra a inspeccionar en un tanque o utilizando un palpador de inmersión local, donde se produce un flujo continuo sobre la misma. Al no tener contacto directo con la muestra, ya que la transmisión del ultrasonido se realiza a través del líquido, no se presentan los problemas de desgaste o los riesgos de rotura del cristal que se pueden presentar con los palpadores de contacto. Además, se pueden manejar frecuencias mayores (cristales con espesores más finos). Ésta clase de palpadores generalmente manejan un rango de operación entre 10 y 25 MHz.

Generalmente se usan dos tipos; uno plano y otro focalizado, en la Figura 37, se aprecian cada uno de ellos.

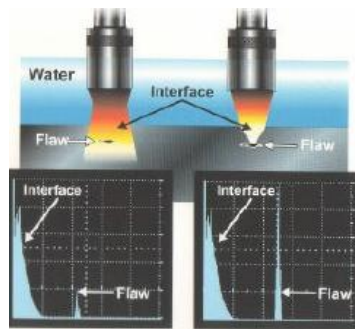
Figura 37. Palpadores de inmersión. Izq. palpador plano, Der. palpador focalizado



*Fuente: Adaptado de [22]

El de tipo plano genera un tipo de haz similar al de un palpador de contacto con haz normal, y se utiliza para ensayar piezas gruesas. El de inmersión tipo focalizado, ubica la intensidad del haz en un área muy pequeña, lo cual es muy importante no solo porque disminuye la recepción de fenómenos perturbadores que se originan por la difusión del haz, sino que además, aumenta en sensibilidad para discontinuidades pequeñas y permite que se pueda pasar a través de recubrimientos de alta atenuación como el acero.

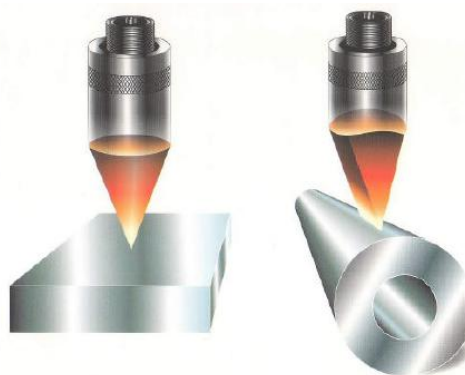
Figura 38. Aumento en sensibilidad para discontinuidades pequeñas



*Fuente: Tomado de [21].

Otra ventaja que presenta, es que tiene buena resolución lateral del haz ultrasónico, lo que permite una evaluación precisa del tamaño real y de la posición del defecto cuya orientación puede no ser perpendicular al haz. Se utiliza para ensayar piezas más delgadas o cuando exista la necesidad de compensar el ensanchamiento del haz ultrasónico causado por la refracción. La focalización puede ser a un punto (Esférico) o a una línea (cilíndrico), como se aprecian en la Figura 39.

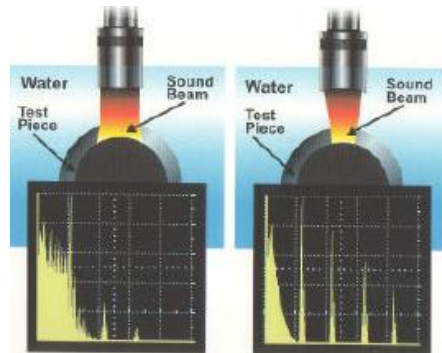
Figura 39. Izquierda focalización a un punto, Derecha focalización a una línea



*Fuente: Tomado de [21].

Con la focalización a una línea en superficies curvas, se puede corregir la entrada haz ultrasónico. En la Figura 40 se aprecia esta ventaja.

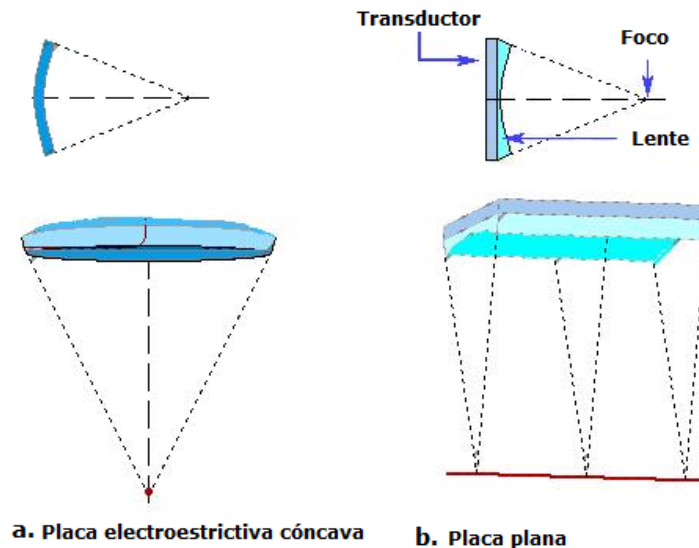
Figura 40. Focalización superficies curvas



*Fuente: Tomado de [21].

Para focalizar el haz ultrasónico se utilizan placas electrostrictivas sintetizadas de forma cóncava (Figura 41a) o mediante el empleo de lentes convergentes que van acopladas al cristal plano (Ver Figura 41b).

Figura 41. a. Placa electrostrictiva cóncava; b. Lente convergente



*Fuente: Adaptado de [12]

Para la valoración del defecto existe una condición necesaria, y es que este debe ser mayor que el foco del transductor.

Este tipo de palpadores es muy utilizado mediante los técnicos impulso-eco, transmisión y resonancia para tratar problemas como defectología y metrología. Y como se pueden manejar frecuencias mayores, también es muy aplicado para problemas de caracterización.

3.3.3.3 Palpadores de escobilla (paintbrush). Utilizados para reducir el tiempo de inspección cuando se examinan grandes áreas. Esta clase de palpador está conformado por muchos cristales pequeños, los cuales están adaptados para reducir variaciones y mantener una sensibilidad uniforme sobre toda la superficie del palpador.

Figura 42. Palpador de escobilla

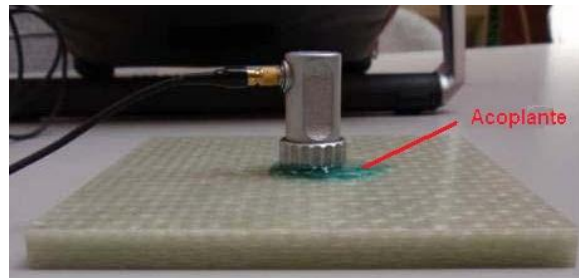


*Fuente: Tomado de [23]

Por ser de gran tamaño, se reduce la sensibilidad y la resolución para la detección de discontinuidades pequeñas. Pero es efectivo cuando se inspecciona por laminaciones. Es usual que se utilice un transductor de haz normal más pequeño y más sensible para definir con mayor precisión los detalles de una discontinuidad detectada por un palpador de escobilla.

3.3.4 Acoplantes: Un acoplante es un material (usualmente líquido) que favorece la transmisión de las ondas ultrasónicas generadas por el palpador, al material que se esté inspeccionando. De esta manera se excluye el aire de entre ellos, ya que el aire no es un buen transmisor de energía ultrasónica (Figura 43).

Figura 43. Acoplante



*Fuente: Tomado de [23]

Cuando se excita con energía eléctrica al cristal piezoeléctrico del transductor, este comienza a vibrar. Estas vibraciones de alta frecuencia se transfieren a través del acoplante a la parte que se inspecciona. A medida que una onda se propaga a través del material, su energía se distribuye por medio de compresión y rarefacción de partículas. La rarefacción se refiere al alejamiento entre sí de las partículas en una onda ultrasónica (opuesto a compresión).

Acoplantes comunes pueden ser agua, aceite, grasa, pasta, entre otros disponibles comercialmente. Es importante que en el momento de utilizarlos, se asegure que el material a examinar sea compatible con él; pues de no serlo, puede conllevar a alguna forma de corrosión.

El agua es un acoplante que presenta mayor disponibilidad y menor precio en comparación con otros en el mercado. No obstante, por tener baja viscosidad no recomendado para ensayos donde se pueda escurrir o se encuentren cerca conexiones eléctricas. Aunque puede presentar reacciones perjudiciales con muchos materiales metálicos, puede ser combinado con otros productos que pueden mejorar estos resultados.

Por su lado, las grasas y aceites minerales son generalmente usados por sus bondades de viscosidad. Los aceites se encuentran en diferentes grados de viscosidad, y el uso entre cada uno de ellos depende de la rugosidad superficial; Ya que entre mayor sea éste último, mayor debe ser el grado de viscosidad del aceite empleado. Otro aspecto importante, es prestar atención a las señales parasitas que se pueden presentar a causa de la generación de ondas superficiales. Las grasas deben emplearse con precaución debido a que la atenuación que producen algunas de ellas es usualmente alta, y se ve afectada su efectividad como acoplante.

Otro acoplante acústicamente muy conductor es la glicerina, pero se puede presentar limitación a la hora de humedecer bien la superficie de la muestra a ensayar. Por esto es generalmente usada en superficies con acabados muy finos. Su viscosidad varía considerablemente con la temperatura, pero se caracteriza por ser uno de los acoplantes más fáciles de remover.

La pulpa de papel y las pastas, pueden mezclarse con casi la mayoría de acoplantes y tenderán a mantener una textura seca. Al igual que la glicerina, son fáciles de remover, pero presentan la dificultad que se endurecen rápidamente.

Para ensayos donde se manejan temperaturas elevadas, se pueden utilizar aceites que tienen alto punto de ebullición, es decir superior a 300°C; o emplear un adaptador fabricado en un material plástico resistente a altas temperaturas, que se acopla al palpador. De esta manera, se emplean acoplantes como grasas y siliconas especiales, que hacen posible la realización de ensayos de muy corta duración a temperaturas que alcanzan los 550°C. y siempre es muy importante dejar que el palpador y el adaptador se enfríen entre dos aplicaciones consecutivas,

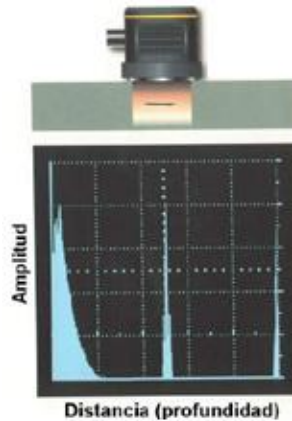
Para los ensayos de inmersión, uno de los medios de acoplamiento es el agua, a la cual se le debe añadir un agente humectante que evite la formación de burbujas en la superficie del palpador que puedan afectar la transmisión del haz ultrasónico. Usualmente, se utiliza kerosén en vez de agua para evitar la oxidación de la muestra de ensayo.

3.4 PRESENTACIÓN DE DATOS EN PANTALLA

En un ensayo con ultrasonido, los resultados obtenidos pueden ser presentados de forma visual, mediante tres tipos de formatos diferentes; Presentación tipo A (A-Scan), tipo B (B-Scan) y tipo C (C-Scan). Los cuales se explican a continuación.

3.4.1 Presentación tipo A (A-Scan). Este tipo de presentación despliega en pantalla la cantidad de energía ultrasónica reflejada y la relación de distancia-tiempo del material que se examina. Es decir, que para una determinada posición del palpador, muestra la respuesta a lo largo del trayecto del haz ultrasónico. De modo que, provee la profundidad (localización) a una discontinuidad y la amplitud (tamaño) de las señales reflejadas. Una discontinuidad se visualiza como un pico (eco).

Figura 44. Representación de datos tipo A-Scan



*Fuente: Tomado de [21].

Para determinar el tamaño de una discontinuidad, se puede comparar la amplitud desplegada en pantalla, de las indicaciones de una discontinuidad presente en la pieza que se examina con las indicaciones de un reflector de referencia de tamaño conocido, con el cual se ha calibrado el equipo ultrasónico previamente. El reflector de referencia, corresponde a una discontinuidad producida artificialmente para comparar el área de una discontinuidad con la amplitud de la indicación. Para determinar la profundidad a la cual se encuentre dicha discontinuidad, se debe observar en pantalla (cuyo barrido horizontal se ha calibrado previamente) la posición de la indicación. (Ampliación en el capítulo de calibración del equipo ultrasónico).

La presentación en pantalla está dada en coordenadas cartesianas, donde el eje vertical representa comúnmente las amplitudes de los ecos, y el eje horizontal representa las distancias; las cuales, son proporcionales al tamaño y a la profundidad de las discontinuidades que generan los ecos. Este tipo de presentación es común en la presentación de la señal en pantalla de cualquier equipo de ultrasonido.

3.4.2 Presentación tipo B (B-Scan) Cuando se realiza un ensayo y se utiliza este tipo de presentación, se visualiza en pantalla un perfil de la muestra examinada. Los equipos que brindan este tipo de presentación permiten obtener una vista de la muestra perpendicular a la superficie de la misma, como si en realidad se estuviera seccionando el material en el área donde se realizó el barrido. Su presentación es en coordenadas cartesianas donde el eje X se relaciona con el movimiento del palpador sobre la superficie y el eje Y con la profundidad de la discontinuidad detectada (representación en sección recta).

Las discontinuidades encontradas dentro del material se verán como puntos brillantes o líneas discontinuas que indican las relaciones de profundidad

relativas entre el reflector y la superficie del material. Lo cual se presenta como una ventaja, ya que tiene la habilidad de mostrar la distribución de discontinuidades en una vista de la sección transversal del objeto que se examina. En la Figura 45 se muestra un ejemplo de una respuesta obtenida con este tipo de presentación.

Figura 45. Presentación de datos tipo B-Scan



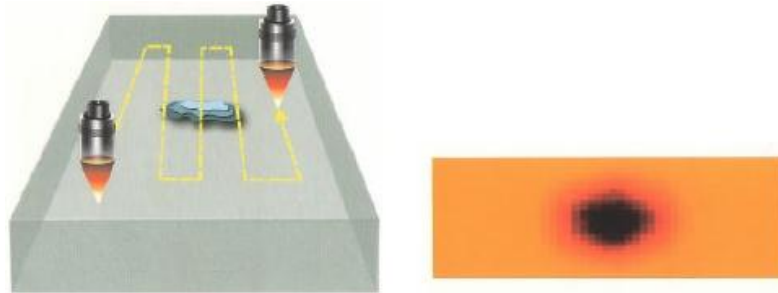
*Fuente: Tomado de [21].

Es usual que se utilice un registrador de papel gráfico junto con la pantalla, a fin de obtener un registro permanente de la inspección. Además, es importante recalcar que, cuando se utiliza en aplicaciones industriales, el ensayo es realizado generalmente por la técnica de inmersión.

Este tipo de presentación es útil cuando se trata de evaluar el espesor de componentes que han sufrido corrosión o erosión.

3.4.3 Presentación tipo C (C-Scan). Este tipo de presentación permite estimar la extensión (longitud y ancho) de la discontinuidad, ya que visualiza su área en un plano paralelo a la superficie a ensayar. Generalmente se utiliza durante los ensayos por inmersión, o cuando el ensayo se efectúa mediante sistemas automáticos.

Figura 46. Presentación de datos tipo C-Scan



*Fuente: Tomado de [21].

Para la visualización de los datos, usualmente se emplean registradoras de papel para generar la representación de estos datos, los cuales, permiten obtener registros permanentes. Además, es común el uso de un TRC con escala Tipo-A, que provee información de profundidad que no es posible obtener con la Escala-C en el registrador de papel.

Algunas inspecciones, son realizadas mediante un brazo robotizado que barre un área completa con sus coordenadas X, Y, y va almacenando la información en la memoria del equipo. Una vez se termina la captura de datos, se muestra en la pantalla del equipo una imagen en pseudocolores, con la apariencia de una termografía, en donde cada color representa un espesor determinado del objeto inspeccionado.

La presentación tipo C, es un complemento a la presentación del barrido tipo B, en donde se obtiene una ubicación espacial muy precisa de los defectos encontrados en el material

3.5 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO ULTRASONICO

3.5.1 Comprobación de la linealidad del equipo. Cuando se utiliza el ultrasonido como ensayo no destructivo, se deben seguir ciertos requisitos en cuanto al comportamiento electrónico de la instrumentación que se utiliza para realizar la inspección. El cumplimiento de estos requisitos y tolerancias de comportamiento asegura una presentación de datos exacta y lineal. Aunque estos requisitos pueden variar de una especificación a otra, el objetivo básico es el mismo.

Cuando se va a hacer uso del instrumento por un tiempo prolongado, o se ha cumplido una fecha predeterminada, lo primero que se debe realizar es un chequeo de la linealidad del mismo. En el caso de una presentación Tipo-A, la linealidad de un instrumento se puede definir como la relación constante exhibida entre indicaciones. Ésta es realizada a través de la revisión de la

linealidad horizontal (barrido horizontal), linealidad vertical y linealidad del control de amplitud.

Antes de realizar la revisión de linealidad, es importante que se defina la escala de tiempo en la pantalla (rangos de pantalla) y se determine la distancia o profundidad de un reflector mostrado en ella. De esta manera, para la escala completa de una pantalla se tiene el valor máximo que puede ser representado en ella; Esto se realiza con el fin de inspeccionar todo el espesor de una pieza que se examina.

Para definir la escala de tiempo en pantalla, es necesario conocer el espesor de la pieza que se va a inspeccionar y a partir de él, se determina el valor de cada división en la pantalla. Este valor se halla a través de las siguientes formulas:

$$vDM = \frac{Rango}{10} \quad (9)$$

$$vdm = \frac{Rango}{50} \quad (10)$$

Donde vDM corresponde al valor de la división mayor, vdm al valor de la división menor y rango corresponde al espesor.

Una vez que se tenga el rango de pantalla adecuado, ya es posible utilizar los controles de barrido, donde se hará la correspondencia de los ecos en pantalla a un espesor conocido de un bloque de calibración.

Para hallar la distancia o profundidad a un reflector que se visualiza en pantalla, se debe multiplicar el número de divisiones donde está ubicada la indicación (#dm) por el valor de cada división. Esta dada por la siguiente fórmula:

$$\mathbf{Profundidad(distancia) = (Rango/50) \times (\#dm)} \quad (11)$$

Es importante tener en cuenta, que cuando se realiza la calibración de la escala de tiempos; ésta puede ser realizada con un palpador de haz longitudinal o con un palpador de haz angulado.

- **Calibración de la base de tiempos con palpador de haz longitudinal:**
Generalmente cuando se utiliza el palpador de haz longitudinal, se hace uso del bloque de calibración V1; el cual permite utilizar dos valores del espesor de referencias (25mm y 100mm) para calibrar la base de tiempos.

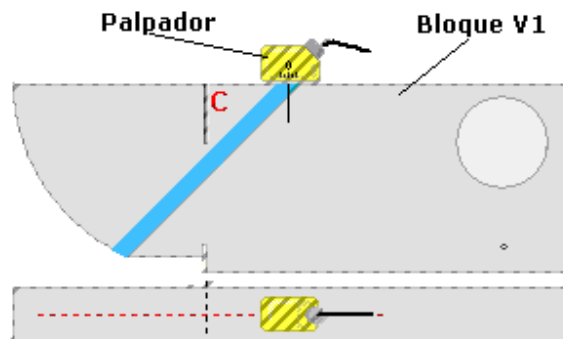
A través de algunos ejemplos se puede ver como se utiliza este bloque:

- a) Para calibración con 100 mm de escala completa, se coloca el palpador sobre el espesor de 25mm del bloque, y de esta manera aparecen en pantalla 4 ecos de fondo en las divisiones 25, 50, 75 y 100.
 - b) Para la calibración con 250mm de escala completa, se ubica el palpador sobre el espesor de 25mm del bloque y en pantalla se visualizan 10 ecos de fondo en las divisiones 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100.
 - c) Para la calibración de escalas completas de 200, 300, 400, 500 o más milímetros, se debe ubicar el palpador sobre el espesor de 100mm del bloque.
- **Calibración de la base de tiempos con el palpador de haz angulado:**
Se puede utilizar tres maneras diferentes, dependiendo de lo que se quiere mostrar en pantalla. Es decir las distancias medidas a lo largo de:
 - a) El haz emitido por el transductor (calibración en recorrido ultrasónico).
 - b) Una línea perpendicular a la superficie de acoplamiento (calibración en profundidad).
 - c) Una línea paralela a la superficie de acoplamiento (calibración en proyección).

De las anteriores, la más usual es la calibración en recorrido ultrasónico, las otras se emplean en situaciones particulares de inspección.

Calibración en recorrido: dependiendo del valor requerido de escala completa, se realiza un determinado procedimiento. Por ejemplo para la calibración en recorrido con un bloque V1 (recomendada para valores de escala completa $\geq 200\text{mm}$), se utiliza la reflexión sobre el perfil circular de radio 100mm del bloque. Se ubica el palpador en el bloque de modo que el perfil circular reciba el haz ultrasónico y se hace coincidir el punto de salida del haz con el centro C (Figura 47).

Figura 47. Calibración en recorrido con bloque V1



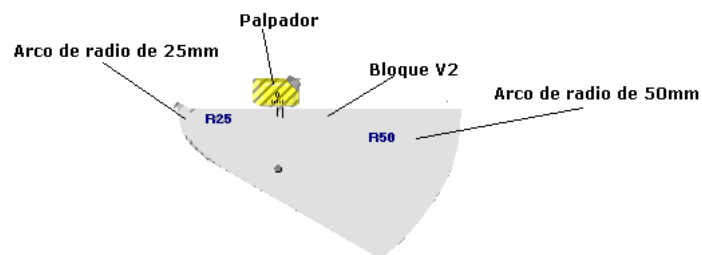
*Fuente: Tomado de [12].

El bloque presenta en el centro dos entallas laterales que proporcionan una sucesión de ecos reflejados. El valor más bajo para la escala completa es 200mm.

Otro ejemplo puede ser la calibración en recorrido con el bloque V2 (valor recomendado de escala completa menor o igual a 200mm). En las especificaciones para este bloque, se tiene, que se usa con palpadores con un tamaño máximo de 8x9mm, cuando se requiere un valor de escala completa menor de 200mm.

Para realizar la calibración en recorrido, se coloca el palpador sobre el bloque de manera que el punto de salida del haz se alinee con el centro común de los dos sectores circulares. La calibración es dada por las reflexiones de estas dos superficies circulares (Figura 48)

Figura 48. Calibración en recorrido con el bloque V2



*Fuente: Tomado de [12].

Como este bloque no presenta entallas en el centro de sus sectores, para cualquier superficie que se dirija el haz se obtiene además el eco de reflexión de la otra. La selección de la superficie para dirigir el haz depende del valor que se requiera para la escala completa. A continuación se muestran algunos ejemplos:

Calibración con escala completa igual a 100mm, donde el haz se envía al arco de radio 25mm de manera que el primer eco coincida con la división 25 y el segundo con la división de 100 en la pantalla.

Calibración con escala completa igual a 250, el haz en este caso también se envía al arco de radio 25mm, de modo que los ecos múltiples corresponden a las divisiones 10, 40, 70 y 100.

Calibración con escala completa igual a 125 mm, en este caso, el haz se envía al arco de radio 50mm, de modo que el primer eco coincida con la división 40 y el segundo con la división 100.

Calibración en profundidad. Para éste procedimiento se puede utilizar el bloque V1, y al iniciar se siguen los pasos que se realizan para una calibración en recorrido, con el mismo valor de escala completa dado por la profundidad. Una vez se tienen posicionados los ecos de referencia en la pantalla, se pasa a calibración en profundidad.

El equipo permite realiza un ajuste manual para ajustar el retardo. Esto permite que las señales se situen en cualquier posición a lo largo de la base de tiempos.

Un eco que inicialmente corresponde a la división l_0 , se desplaza a la división

$$l = l_0 \cos \alpha \quad (12)$$

donde α es el ángulo de emisión del palpador.

Calibración en proyección. Para este procedimiento se utiliza el bloque V1, y se comienza una vez se hayan finalizado los pasos que se realizan para la calibración en recorrido con el mismo valor de escala completa dado en proyección. Luego se inicia la calibración en proyección volviendo a posicionar los ecos de referencia en la pantalla; un eco que inicialmente corresponde a la división l_0 se desplaza a la división $l = l_0 \sin \alpha$, donde α es el ángulo de emisión del palpador.

El procedimiento de calibración en proyección está incluido en el código ASME sección V, el cual se refiere al examen de uniones soldadas.

3.5.1.1 Linealidad Horizontal. Puede ser determinada colocando un palpador de haz normal en un bloque de calibración apropiado para este procedimiento y ajustando los controles de barrido y "delay"; para desplegar un eco de la superficie de fondo y nueve múltiplos. El eco de la superficie de fondo corresponde al tiempo total que el ultrasonido necesita para viajar de la superficie de entrada de la pieza examinada a la pared de fondo de la misma, y regresar nuevamente al transductor; Un múltiplo a una indicación repetitiva del eco de fondo.

De manera general, podemos decir que el procedimiento necesario para realizar la calibración de la linealidad horizontal del equipo ultrasónico consiste en; seleccionar un bloque de referencia de determinado espesor y comparar la relación entre el valor del espesor que despliega en pantalla con el espesor real del material seleccionado.

El barrido horizontal está graduado en incrementos de distancias iguales, similar a una cinta de medir. Van marcados y numerados en la caratula de la pantalla. Típicamente son diez divisiones mayores y 50 divisiones menores a lo

largo de la línea base de la pantalla, que permiten representar cualquier distancia que se desee desde 0.500" hasta 100". Aunque, el sistema de división de la pantalla puede variar entre un equipo y otro, su propósito sigue siendo el mismo.

Generalmente, es necesario realizar un retardo (retardar la aparición de las indicaciones en pantalla) de lo desplegado en el barrido horizontal, hacia la derecha (con el control delay), para identificar el pulso inicial. Éste corresponde a la primera señal que aparece en el tiempo. Además, cada indicación debe colocarse en el barrido de manera que el valor del espesor seleccionado sea representado entre cada una de ellas; es decir, que cada eco obtenido, debe ser ajustado lo más cerca posible a su respectiva división en el barrido horizontal.

La localización de cada eco debe estar dentro de $\pm 2\%$ del ancho total de la pantalla para proveer una linealidad adecuada. Así, cuando la linealidad del barrido horizontal se encuentra calibrada, se podrán determinar con precisión las mediciones exactas del espesor de un material. Es importante resaltar que una calibración de barrido no siempre será la adecuada para realizar diferentes inspecciones, pues la calibración realizada solo será útil para las especificaciones de material y espesor con las que fue previamente calibrado. Por ejemplo si se calibra un barrido a 2.5", no será adecuado para inspeccionar 5" de material.

De obtenerse un barrido horizontal no-lineal, podrían obtenerse datos de profundidad incorrectos durante una inspección. Por lo cual realizar esta calibración es de gran importancia, teniendo presente que, en el momento de estar revisando linealidad se debe apagar el control de rechazo (reject) en el equipo. Ya que este control puede afectar la linealidad vertical del equipo, la cual es otro aspecto importante que se debe revisar y que se realiza en conjunto con la revisión de la linealidad horizontal.

3.5.1.2 Linealidad vertical. Corresponde a la proporcionalidad entre la altura de las señales que son visualizadas en pantalla y el voltaje del pulso que las crea. De modo que al doblar éste voltaje, también se dobla la altura, o si se triplica el voltaje la señal se triplica, y así sucesivamente.

Uno de los métodos para comprobar la linealidad vertical del equipo consiste en representar dos ecos simultáneamente y usando el control de amplificación se observa si el equipo puede mantener una relación constante entre sus alturas.

El método de prueba consiste tomar un bloque de referencia, por ejemplo; uno de aluminio que cuenta con 2 orificios (reflectores) de 1 mm de diámetro y alturas diferentes en una relación 2 a 1.

Se generan ecos simultáneos provenientes de ellos y posteriormente, se lleva el eco del orificio más alto al 80% de la altura de la pantalla, usando los controles de amplificación, después, se lleva el mismo eco a diferentes alturas en la pantalla y se va comprobando que el eco del orificio inferior está dentro de un intervalo especificado. Las alturas a las que debe ser llevado el eco mayor deben estar descritas dentro de las normas de referencia (ejemplo la Norma ASTM 317), al igual que los intervalos donde debe mantenerse el eco menor para que exista la linealidad vertical del equipo.

El otro método de comprobación de la linealidad vertical del equipo, se basa en las propiedades de reflexión del haz sobre superficies planas lisas, orientadas perpendicularmente a su eje. En este caso, la intensidad ultrasónica reflejada al transductor receptor es proporcional al área de la superficie reflectante.

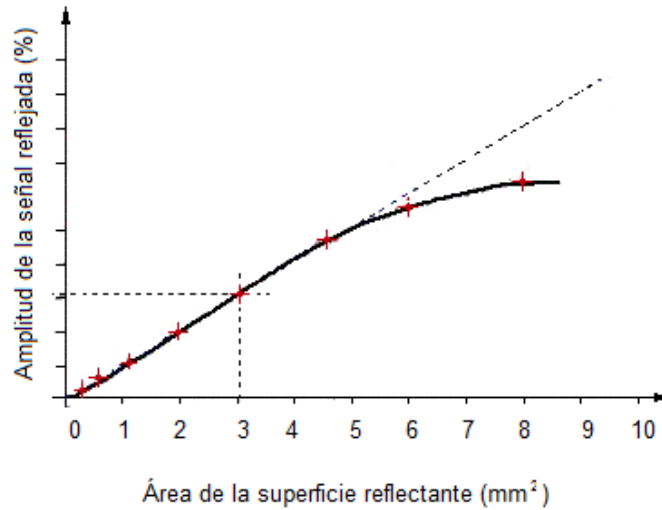
El método consiste en construir una curva superficie-amplitud, donde el eje X da la amplitud de las superficies reflectantes y el eje Y muestra las alturas de los ecos como un porcentaje de la altura de la pantalla.

En el caso ideal para linealidad vertical, la curva superficie-amplitud es una línea que pasa por el origen. La curva real, normalmente se desvía de la curva ideal, y su desviación da una indicación de la linealidad del equipo.

Para la construcción de la curva, se toma un bloque de referencia, y se envía el haz al orificio de fondo, luego se ajusta el control de amplitud para llevar la señal reflejada al 31% de la altura de la pantalla.

Se marca en un diagrama superficie-amplitud (puede ser realizado en una hoja milimetrada) el punto P (punto de referencia) que corresponde a la superficie S del orificio de fondo y con la amplitud de la señal reflejada de R (31%). Luego sin cambiar el nivel de amplificación del equipo, se envía el haz a los orificios de los demás de la misma serie, marcando siempre en el diagrama las alturas de los ecos correspondientes. Al unir los puntos se obtiene el diagrama superficie-amplitud como se observa en la figura 49.

Figura 49. Diagrama superficie-amplitud



*Fuente: Adaptado de [12]

3.5.1.3 Linealidad del control de amplitud. La linealidad del control de amplitud (Gain), corresponde a la revisión del correcto funcionamiento de los controles de amplificación del equipo, y permite asegurar comparaciones exactas en dB de una discontinuidad a otra sobre la altura de la escala completa de la pantalla.

Para realizar esta revisión, es necesario utilizar un bloque de referencia adecuado para éste proceso. Se coloca el palpador sobre él y se produce un eco en la línea horizontal a media pantalla (punto a medio camino entre el extremo izquierdo y derecho del barrido horizontal de la pantalla), se ajusta a 80% de la altura total de la pantalla y luego se aumenta el control de ganancia siguiendo las indicaciones de la Tabla 5. De manera que las amplitudes para cada ganancia deben caer dentro de las tolerancias especificadas en esta tabla.

Tabla 5. Tolerancias de amplitudes por ganancia

% de Pantalla (donde se ubica el eco)	Cambio en dBs	Límite del eco en % Amplitud
80	-6	32 a 48
80	-12	16 a 24
40	+6	64 a 96
20	+12	64 a 96

*Fuente: Tomado de [1].

Los registros de las pruebas de linealidad deben guardarse y ser trazables al instrumento. Al cual, es frecuente que se le coloque una estampa de certificación donde se indique cuando se realizó la revisión y calibración, y cuando debe ser realizado este procedimiento nuevamente. En caso de que no se adecue el instrumento a las exigencias de una especificación, se deberán realizar ajustes electrónicos internos para corregir el error de linealidad. Este proceso solo debe ser realizado por un representante del fabricante del instrumento o por un servicio de calibración reconocido.

3.5.2 Sensibilidad. Cuando se realiza una inspección por ultrasonido, la valoración de una discontinuidad se realiza comparando la amplitud de su señal reflejada con la de la señal de un reflector artificial (defecto de referencia), el cual corresponde a un orificio realizado en el bloque de referencia. Teniendo en cuenta que la discontinuidad de referencia es representativa de las discontinuidades que se esperan encontrar en la pieza a inspeccionar.

Para definir la amplitud de referencia se envía un haz al defecto de referencia y se ajusta la amplificación de manera que el eco reflejado se ubique a una altura fija en la pantalla, generalmente 75% o 80%. De manera que, durante un ensayo, las discontinuidades que sean detectadas se valoran de acuerdo a esta altura y se puede obtener un límite de referencia para distinguir entre defectos aceptables y no aceptables.

Dado que la discontinuidad de referencia es plana y regular, y la discontinuidad natural puede presentar una superficie rugosa e irregular. Se puede decir que, el tamaño de un defecto que alcance 75% de la altura de la pantalla, será mayor que el tamaño del defecto artificial correspondiente.

Al realizar un ensayo ultrasónico, es muy importante evaluar correctamente la importancia de los defectos encontrados, pues se debe tener en cuenta la atenuación estructural y geométrica a la que está sometido el haz cuando atraviesa determinado medio. Ya que una discontinuidad muy alejada, se podría considerar un defecto aceptable, pues la señal que lo está representando estaría por debajo de la amplitud de referencia. Para esto, se puede realizar el proceso de calibración de manera que se tenga en cuenta la longitud del recorrido ultrasónico. Para la cual, se debe trazar en la pantalla una curva que representa la variación de la amplitud de referencia con la distancia entre el defecto de referencia y el palpador. Esta curva se denomina Curva de Amplitud- Distancia (CAD⁸).

⁸ CAD: Curva de Amplitud-Distancia

3.5.3 Curva de Amplitud-Distancia (CAD). Este procedimiento equivale a la construcción de una curva de corrección amplitud-distancia. Ésta curva permite aplicar un criterio para aceptar/rechazar los ecos producidos por discontinuidades durante una inspección.

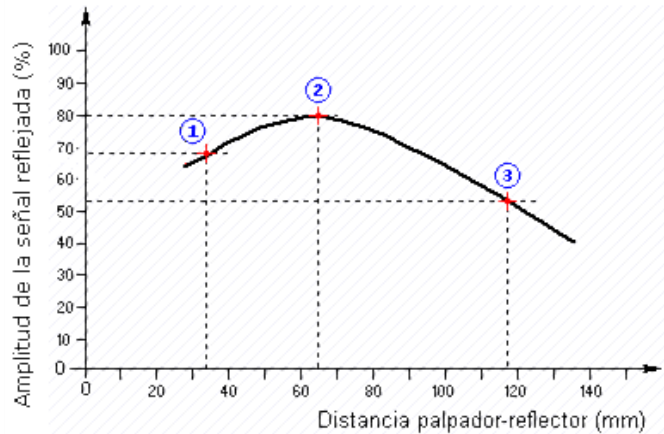
Una curva CAD permite establecer un nivel sensitivo de referencia, el cual, se obtiene utilizando las reflexiones de una serie de defectos que están dispuestos en un bloque de referencia. En las especificaciones de la inspección se establece el tipo de bloque de referencia que debe ser usado, así como las posiciones del palpador.

Para crear la curva CAD se selecciona un bloque de referencia que contenga reflectores de referencia (seleccionado teniendo en cuenta el tipo de material y el espesor de la pieza que se va a inspeccionar); Se ubica el palpador sobre el bloque y se envía un haz a uno de los orificios de referencia, realizando pequeños movimientos para poder obtener una posición del palpador donde se halle la amplitud máxima del eco reflejado. Se realiza el mismo proceso para los demás orificios, de manera que se obtiene el punto de reflexión máximo para todos los orificios.

A continuación, Se sitúa el palpador donde se encontró el eco de amplitud máxima, y sin mover el palpador, se ajusta la altura de la señal a un porcentaje de la altura de la pantalla, generalmente 75% o el 80%, y se marca sobre la pantalla un punto en el pico de la señal. Luego, sin realizar cambios en el nivel de amplificación, se ubica el palpador donde se produzca la máxima amplitud para los demás orificios, y se va marcando sobre la pantalla un punto en el pico de la señal producida en cada uno de ellos.

Finalmente se unen los puntos marcados en la pantalla con una línea suave (es común el uso de un color de cera). La figura 50, muestra un ejemplo de la curva CAD.

Figura 50. Curva de Corrección Amplitud-Distancia



*Fuente: Adaptado de [12].

3.5.3.1 Evaluación de discontinuidades. Corresponde a evaluar la importancia de la discontinuidad considerando la amplitud del eco reflejado en comparación con la altura de la curva CAD.

El eco obtenido puede tener una amplitud con alguna de las siguientes características:

- De la misma altura de la línea de referencia, de manera que la discontinuidad tiene una importancia del 100%.
- Por encima de la curva CAD, lo que indica que la discontinuidad tiene una importancia del 100%, más el número de decibelios que se requieren para bajar la amplificación de manera que el pico del eco tenga la misma altura de la curva.
- Por debajo de la línea de referencia, de manera que la importancia de la discontinuidad está dada por el cociente (expresado en valor porcentual) entre la altura del eco y la altura correspondiente de la curva.

3.5.4 Caracterización de los palpadores. Es importante que durante la calibración del equipo ultrasónico, se revise el funcionamiento del palpador. Éste procedimiento involucra la revisión del punto de salida del haz, su alineación, y en el caso de los palpadores angulares el ángulo de salida.

3.5.4.1 Caracterización de palpadores normales. Para la mayoría de transductores empleados en ensayos con ultrasonido (transductores de sección circular), y por motivos de practicidad, se puede considerar que el haz está dividido en dos zonas; una zona cilíndrica ubicada cerca de la fuente, y una cónica que se extiende más allá del campo próximo (Ver haz ultrasónico). Con

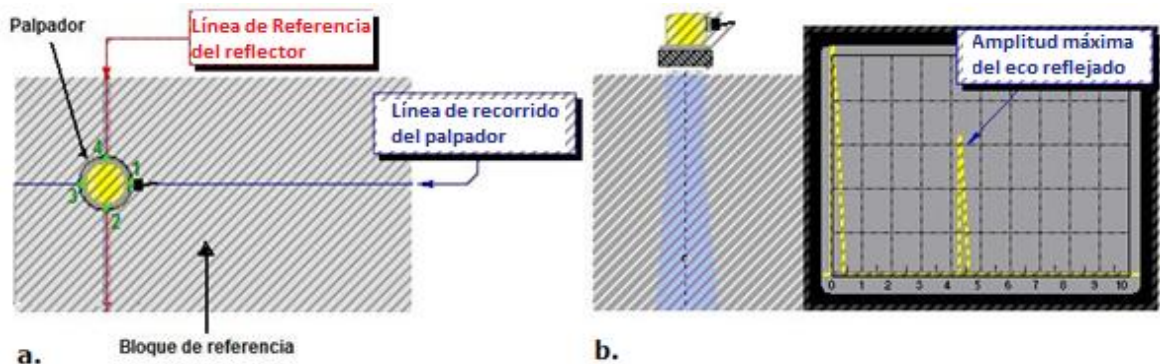
base en esta apreciación, se puede decir que el haz está delimitado por la superficie (línea exterior) donde la presión acústica es 20 decibelios menor que lo valores máximos que se alcanza en el eje.

Perfil del haz. La intersección del exterior del haz con un plano geométrico que cruza el eje, da el perfil del haz en ese plano.[12]

El perfil del haz se determina mediante bloques de referencia que contienen orificios cilíndricos que se encuentran a profundidades conocidas de la superficie del bloque. La amplitud del eco del reflector cambia cuando se varía la posición del palpador sobre la superficie del bloque, de modo que es máxima cuando el eje del haz pasa por el orificio y es 20 dB menor cuando solo toca el orificio. El recorrido que cubre el palpador entre estas dos posiciones coincide con la mitad del ancho del haz a la profundidad del reflector.

El procedimiento para definir el perfil del haz, consiste en marcar 4 puntos de referencia en el palpador a 90° uno de otro (Figura 51a). Se coloca el palpador sobre una de las superficies bloque (por ejemplo a la máxima distancia del reflector) y luego se halla la posición donde el eco del reflector tiene amplitud máxima (Figura 51b). Se prosigue a desplazar el palpador para obtener otro punto de referencia opuesto sobre la misma línea a ángulos rectos respecto de la línea de referencia, se amplifica el eco reflejado de manera que se alcance 100% de la altura de la pantalla y se marca la posición del palpador en el bloque (posición a).

Figura 51. Perfil del haz ultrasónico para palpador normal



*Fuente: Adaptado de [12].

Posteriormente, se debe calcular la altura del eco que corresponde a una reducción de 20 decibelios y marcarla en la pantalla; se desplaza el palpador a lo largo de su línea hasta que el eco del orificio haya disminuido en altura 20 dB⁹ (Posición b). Ahora, se debe medir la distancia (X_1) entre la posición a y la

⁹ dB: Decibel, decibelios

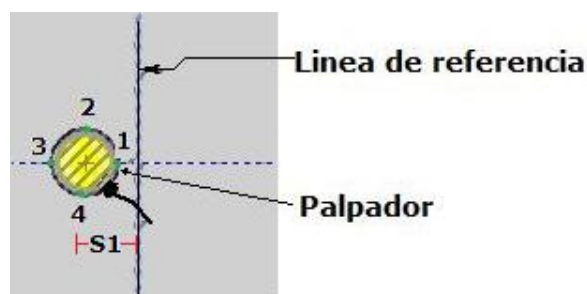
posición b , la cual equivale a la mitad del ancho del haz respecto a la profundidad del reflector y la referencia número 1 (punto 1 de los 4 marcados) del palpador.

Se debe repetir el mismo proceso para los demás puntos de referencia (2,3,y 4), girando cada vez el palpador 90° . De esta manera se obtienen las demás distancias (X_2, X_3, X_4). Estas distancias deben ser registradas en un plano cartesiano respecto a la profundidad del reflector. Se repite todo el proceso variando la profundidad del reflector (mover el palpador a otras superficies del bloque) [12]

Alineación del Haz. Un palpador normal genera un haz ultrasónico perpendicular a su superficie de salida. Debido al uso y a defectos de fabricación, puede que el haz no sea perpendicular a dicha superficie, por tanto, se considera que el haz está desalineado y se deberá medir su ángulo de inclinación. La alineación del haz debe realizarse previamente a la comprobación del perfil.

El ángulo está definido por el eje del haz y la línea que pasa por el punto donde el haz sale del palpador, y que es perpendicular a la superficie de salida. Para realizar la alineación, se toma un bloque de referencia y se le marcan cuatro puntos al palpador, a 90° uno de otro (Figura 52). Se halla la señal de mayor amplitud del orificio moviendo el palpador a lo largo de la dirección 1 a 3. Perpendicular a la línea de referencia del bloque. Se obtiene la señal máxima cuando el transductor está a una distancia (S_1) de la línea de referencia.[12]

Figura 52. Alineación del haz en palpadores normales

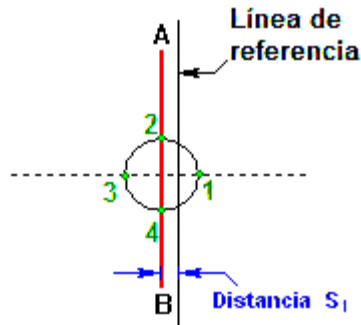


*Fuente: Adaptado de [12].

En una representación gráfica del transductor, se traza la línea AB a distancia S_1 de la línea de referencia (Figura 53). Ahora, se gira el palpador 90° y se halla el eco máximo moviendo el palpador a lo largo de la línea 2 a 4. Al igual que en el procedimiento anterior, se obtiene la máxima respuesta cuando el transductor no está sobre

la línea de referencia. La distancia entre el centro del palpador y la línea de referencia es S_2 . Se traza en el mismo gráfico una línea (CD) a una distancia S_2 de la línea de 1 a 3 (La línea CD es perpendicular a la línea AB trazada anteriormente). Se traza el segmento que une el punto de intersección de AB y de 1 a 3 (punto O), con la intersección de CD con la línea de referencia (M).

Figura 53. Representación gráfica del palpador



*Fuente: Adaptado de [12].

El segmento OM indica la dirección de la desalineación del haz; el ángulo (σ) de desalineación se puede calcular con la siguiente relación:

$$tg\sigma = \frac{\overline{OM}}{d} \quad (13)$$

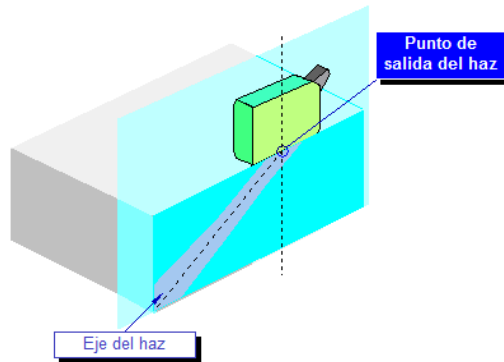
Donde, d corresponde a la profundidad del orificio. Y \overline{OM} la longitud del segmento; y está dada por:

$$\overline{OM} = \sqrt{s_1^2 + s_2^2} \quad (14)$$

3.5.4.2 Caracterización de palpadores angulares. Al igual que con los palpadores normales, es importante que antes de hacer uso de estos palpadores, se verifique el perfil y la alineación del haz. Adicionalmente con este tipo de palpadores se debe verificar el punto de salida del haz y el ángulo de salida.

Punto de salida del haz. Corresponde al punto en el que el eje del haz ultrasónico encuentra la superficie de la pieza a inspeccionar (Figura 54). Es común que los palpadores lleven una indicación o marca del punto de salida del haz, pero por motivos como el desgaste de la zapata o defectos de fabricación, ésta posición puede ser muy diferente de la real.

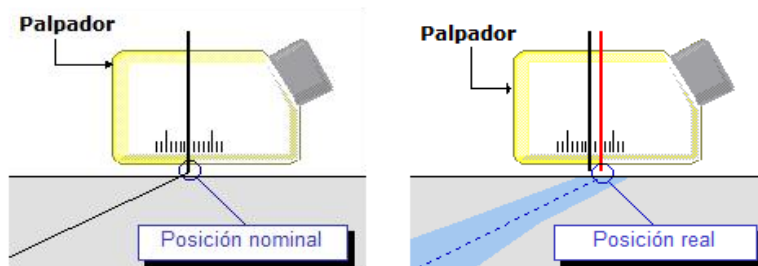
Figura 54. Punto de salida del haz



*Fuente: Adaptado de [12].

La indicación del punto de salida en el palpador se denomina posición nominal (puede ser una entalla en un lado del palpador), ésta posición puede ser distinta de la real por las causas antes mencionadas (Figura 55).

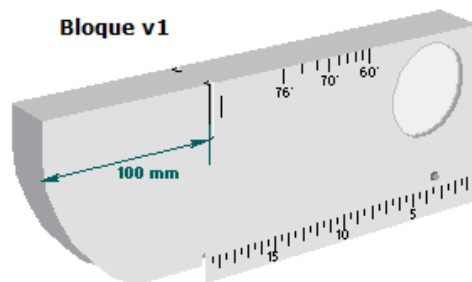
Figura 55. Posición nominal y posición real del haz



*Fuente: Adaptado de [12].

Para identificar el punto de salida del haz, se hace uso del bloque de referencia V1; del cual se utiliza la reflexión sobre la superficie curva de 100mm de radio (Figura 56).

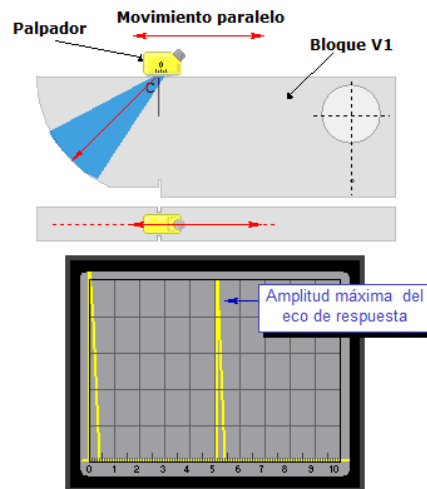
Figura 56. Bloque de referencia V1



*Fuente: Tomado de [12].

Se coloca el palpador sobre el bloque en el centro C de la superficie curva, de modo que se envía el haz hacia ella. Se mueve el palpador lentamente hacia adelante y hacia atrás, con el fin de determinar la posición donde el eco de respuesta tenga amplitud máxima. El palpador debe mantenerse paralelo a las superficies del bloque, de manera que el haz sea perpendicular a la superficie curva (Figura 57).

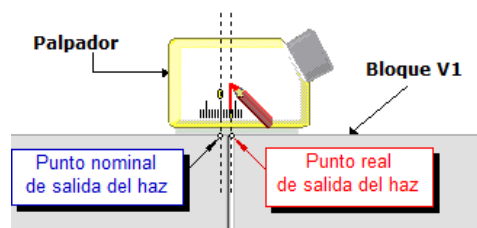
Figura 57. Determinación máxima amplitud del eco



*Fuente: Adaptado de [12].

Cuando se obtiene el eco máximo, el punto real de salida del haz del palpador coincide con el centro de la superficie curva del bloque. Se debe marcar en un lado de zapata el punto exacto de salida del haz.

Figura 58. Marcación punto exacto de la salida del haz



*Fuente: Adaptado de [12].

Ángulo de salida. Corresponde al ángulo con el que el haz sale del palpador, y se denomina ángulo real; el cual, describe el ángulo de inclinación cuando entra en la pieza a inspeccionar. Éste ángulo se debe medir entre la

perpendicular a la superficie de acoplamiento en el punto de salida del haz y el eje del haz.

El ángulo real puede presentar variaciones, al igual que el punto de salida. Estas variaciones están relacionadas con los cambios en la orientación del haz, los cuales pueden ser producidos por desgaste de la superficie de acoplamiento. Para determinar el ángulo real del palpador, se toma el bloque de referencia V1; del cual se observan las reflexiones que se producen en el material de relleno plástico (perspex). Se ubica el palpador de acuerdo a su ángulo real en cualquiera de las siguientes posiciones:

- A) Para palpadores con ángulos reales entre $35^{\circ} \leq \alpha \leq 60^{\circ}$, dirigiendo el haz al perspex.
- B) Para palpadores con ángulos reales entre $60^{\circ} \leq \alpha \leq 75^{\circ}$, dirigiendo el haz al perspex, al igual que en el caso (A).
- C) Para palpadores con ángulos reales entre $75^{\circ} \leq \alpha \leq 80^{\circ}$, dirigiendo el haz hacia el orificio de 1.5.

Se procede a mover el palpador suavemente hacia adelante y hacia atrás, manteniéndolo paralelo a las superficies laterales del bloque, y se encuentra la posición donde el eco de respuesta del perspex (o del orificio) tenga la máxima amplitud. El bloque de referencia cuenta con una escala graduada, que indicará el valor real del ángulo.[12]

Alineación del haz. El eje del haz ultrasónico en un palpador angular, se encuentra en un plano perpendicular a la superficie de salida del haz desde el palpador y el paralelo al eje del palpador. Es posible que el haz se encuentre desalineado; el plano no es perpendicular al eje del palpador a causa de defectos de fabricación. Al presentarse este hecho, se ve la necesidad de medir el ángulo de desalineación. El cual se define, como el ángulo que forman; el plano que pasa por eje del palpador y el plano que pasa por eje del haz ultrasónico. Ambos perpendiculares a la zapata.

Para medir el ángulo, se coloca el palpador sobre el bloque de referencia V1, dirigiendo el haz al inferior del bloque. Girando el palpador se ubica la posición de reflexión máxima, y se situa una regla en la zapata. El ángulo que se forma entre la regla el borde del bloque es el ángulo de desviación del eje acústico del haz (se puede medir exactamente con un goniómetro¹⁰).

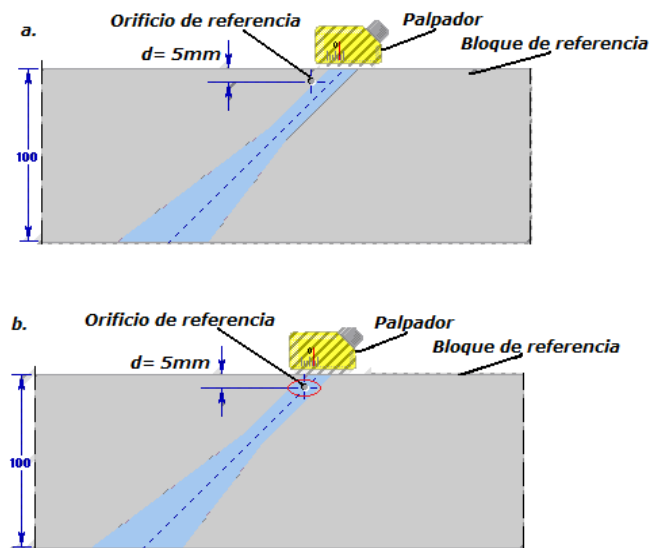
Perfil del haz. Para determinar el perfil del haz en palpadores angulares, se utiliza un procedimiento similar al realizado con palpadores normales, excepto,

¹⁰ Goniómetro: Instrumento que sirve para medir ángulos.(Diccionario de la lengua Española - vigésima segunda edición)

que en este caso se deben considerar dos perfiles: en el plano vertical y en el plano horizontal.

- **Perfil en el plano vertical.** Tomando un bloque de referencia (10W, 354 X 100X75mm), se realiza la calibración de la base de tiempos utilizando un fin de escala adecuado; se procede a colocar el palpador en la superficie de 75 X 354 mm del bloque (Figura 59a), con el fin de que el orificio mecanizado de 5mm reciba el haz y se halla la posición donde el eco reflejado tiene la máxima amplitud (Figura 59b).

Figura 59. Perfil en el plano vertical



*Fuente: Adaptado de [12].

Se amplifica este eco hasta llevarlo al 100% de la altura de la pantalla y se calcula la altura del eco correspondiente a 20 dB y se marca en pantalla. Se marca la posición del punto de salida del haz del palpador en el lado del bloque. Se mueve el palpador hasta reducir la altura del eco de reflexión del orificio en 20 dB, y marcar el punto de salida del haz del palpador en el bloque.

Se mueve ahora el palpador hacia atrás hasta que el eco de reflexión del orificio, después de alcanzar su altura máxima, baje 20 dB, y se marca nuevamente la salida del haz del palpador. En una hoja cuadrículada, se traza un diagrama cartesiano con las desviaciones del palpador en el eje X, y las profundidades del orificio en el eje Y; se traza en el diagrama el eje del haz, inclinado en el ángulo real del haz, y se marcan las desviaciones x e y del palpador a una profundidad de 5 mm, midiéndose directamente los valores en el lado del bloque.

Se repiten los pasos del procedimiento para los orificios situados a profundidades de 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 mm, marcando siempre el valor de cada desviación x e y del palpador en los ejes cartesianos.

Al finalizar, se unen los puntos marcados en el diagrama, el perfil resultante es el perfil del haz emitido por el transductor en el plano vertical.[12]

- **Perfil en el plano horizontal.** Para hallarlo, se toma el bloque de referencia 10W [(354x100x75 mm) (14x4x3 en)] y se realiza la calibración de la base de tiempos, utilizando un fin de escala adecuado. Luego, se ubica el palpador en la superficie de 75x354 mm [3x14 en] del bloque, de modo que el orificio mecanizado a 15 mm [0.6 en] reciba el haz con el eje del palpador centrado respecto del desarrollo longitudinal del orificio. Se determina la posición del palpador para la cual el eco reflejado por el orificio tenga la máxima amplitud.

Se traza sobre el bloque de referencia una línea de referencia (R) que corresponde al lado posterior del palpador (la línea debe ser perpendicular a la superficie lateral del bloque), se amplifica el eco reflejado hasta alcanzar el 100% de la altura de la pantalla. Se calcula altura del eco correspondiente a 20 dB y se marca en la pantalla, luego se mueve el palpador a lo largo de la línea de referencia (R) hacia el extremo cerrado del orificio hasta que el eco reflejado se reduce en 20 dB. Se mide la distancia (X_2) entre el eje del palpador y el bloque de referencia; desde el lado opuesto, se dirige el haz al mismo orificio, de manera que esté centrado con respecto al desarrollo longitudinal del orificio. Y se halla la posición donde se obtenga la máxima amplitud del eco reflejado por el orificio.

Se traza una línea de referencia (R') que corresponde al lado posterior del palpador. Se mueve el palpador a lo largo de ésta línea de modo que al igual que en el procedimiento anterior, el eco se reduce 20 dB y se mide en el bloque la distancia (X_1) como se hizo con la distancia (X_2). En una hoja cuadrículada se traza el diagrama cartesiano con las desviaciones del palpador en el eje x y los recorridos ultrasónicos(L) en el eje, leídos en la base de tiempos o calculados usando la ecuación 15:

$$L = \frac{d}{\cos\alpha} - 0,75 \quad (15)$$

Donde d corresponde a la profundidad y 0,75 mm es el radio del orificio.

Para una profundidad de 15mm se determinan desviaciones del palpador de X_1-35 y X_2-35 , donde 35 (mm) equivale a la longitud del orificio; si el haz es simétrico las dos diferencias son iguales. Luego, se procede a realizar el mismo procedimiento para los demás orificios del bloque, los cuales se

encuentran a diferentes profundidades; y se marca el valor de cada desviación del palpador para los ejes x e y en la hoja cuadrículada.

Finalmente se unen los puntos marcados en el diagrama, de manera que el perfil resultante es el perfil real del haz emitido por el palpador en el plano horizontal.

Poder de resolución transversal. Denominado también de resolución angular. Es el parámetro que describe la apertura del haz en relación a su recorrido; el cual está relacionado con la capacidad de separar dos ecos que proceden de reflectores adyacentes. Si la sección recta del haz es menor, más fácil será manejar este tipo de situaciones.

Se toma el bloque de referencia (bloque de acero de 15x100x250mm, [1x6x9.8in]), y se coloca el palpador de manera que el haz se dirija al orificio de 1,5mm a una distancia de medio salto ($R_{1/2}$). Ésta distancia puede ser expresada en función del espesor del bloque (t) y del ángulo del haz del palpador (α) de la siguiente manera:

$$R_{1/2} = t \tan(\alpha) \quad (16)$$

El eco reflejado se maximiza hasta llevarlo al 80% de la altura de la pantalla. Se coloca una guía recta detrás del palpador, de manera que este se mueva perpendicular al eje del bloque y se marca la posición del palpador en la guía. Se mueve el palpador a la izquierda y a la derecha, paralelo a la guía; hasta que el eco disminuye 6 dB, y se marcan las posiciones relativas. Se mide la distancia entre los dos puntos ($D_{1/2}$). Se repiten los pasos anteriores, colocando el palpador a un salto y a salto y medio; con los cuales se obtienen las distancia D_1 y $D_{11/2}$.

El índice de resolución transversal se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

$$[\tan(\theta)]_{1/2} = \frac{D_{1/2}}{R_{1/2}} \quad (17)$$

$$[\tan(\theta)]_1 = \frac{D_1}{R_1} \quad (18)$$

$$[\tan(\theta)]_{11/2} = \frac{D_{11/2}}{R_{11/2}} \quad (19)$$

Reserva de amplificación. Describe cuantos decibelios se puede aumentar un eco de referencia después de haber alcanzado 2/5 de la altura de la pantalla, de manera de que los ecos parásitos no sobrepasen 1/5 de la altura de la pantalla.

Los resultados que se obtienen durante esta prueba, no solo dependen de las características del palpador, sino también de las características del equipo en conjunto. Por tanto, cuando se realizan ensayos para comparar diferentes palpadores, estos ensayos son significativos si se utiliza el mismo generador y los mismos cables, de manera que solo se haga cambio del transductor.

Para calcular la reserva de amplificación, se hace uso del bloque V1 y se coloca sobre él el palpador; exactamente en el centro del arco de radio 100mm. Se lleva el eco al 40% de la altura de la pantalla y se registra el valor de amplificación (A_1). Se aumenta la amplificación hasta que los ecos parásitos adyacentes al eco principal superen el 20% de la altura de la pantalla. Se registra este valor de amplificación (A_2).[12]

De esta manera, la reserva de amplificación V_r está dada por:

$$V_r = A_2 - A_1 \quad (20)$$

3.5.5 Bloques de referencia. Para la calibración de los equipos ultrasónicos, se utilizan bloques que tienen en su interior discontinuidades artificiales, los cuales son llamados orificios de referencia. A través de estos orificios, se puede determinar las características de operación del equipo ultrasónico, y además, permiten establecer y reproducir los ecos que se pueden obtener durante la inspección de una pieza o muestra.

Cuando estos bloques son usados con el propósito de comprobar las funciones del equipo y palpadores (comprobación de la linealidad del equipo y caracterización de los palpadores), que van a ser usados durante una inspección; y cuando se utilizan para preparar el equipo para detectar la posición y el tamaño de las discontinuidades encontradas durante un ensayo (calibración de la base de tiempo y calibración del control de sensibilidad).

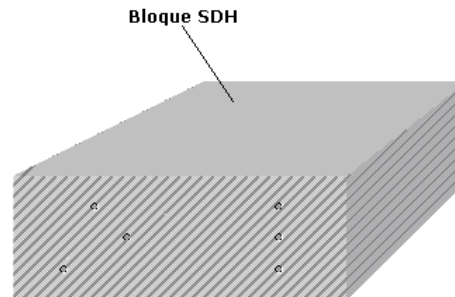
Los bloques normalizados de referencia comúnmente usados son:

- 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 y Bloque de Calibración en Resolución.

3.5.5.1 Bloque SDH. Este bloque está recomendado por la sección V del código de ASME para la calibración de uniones soldadas (Figura 60). Es utilizado para la calibración de la base tiempos y para la construcción de las

curvas de corrección amplitud-distancia en el ensayo de cualquier espesor. De manera, que su espesor y el diámetro de sus orificios varían en función del espesor de la pieza a inspeccionar. Es usado tanto con palpadores normales como angulares.

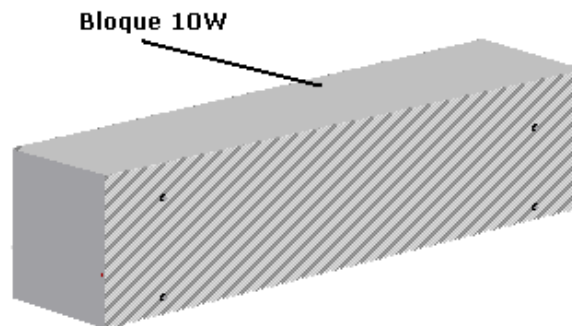
Figura 60. Bloque SDH



*Fuente: Tomado de [12].

3.5.5.2 Bloque 10W. También llamado holandés, es un bloque de acero con dimensiones 354x100x75mm (Figura 61). Está diseñado para determinar el perfil del haz ultrasónico emitido por un palpador angular.

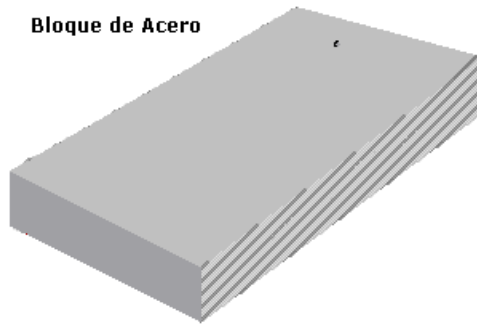
Figura 61. Bloque 10W



*Fuente: Tomado de [12].

3.5.5.3 Bloque de acero 25x150x250. Este bloque es empleado para determinar el poder de resolución transversal de los palpadores (Figura 62).

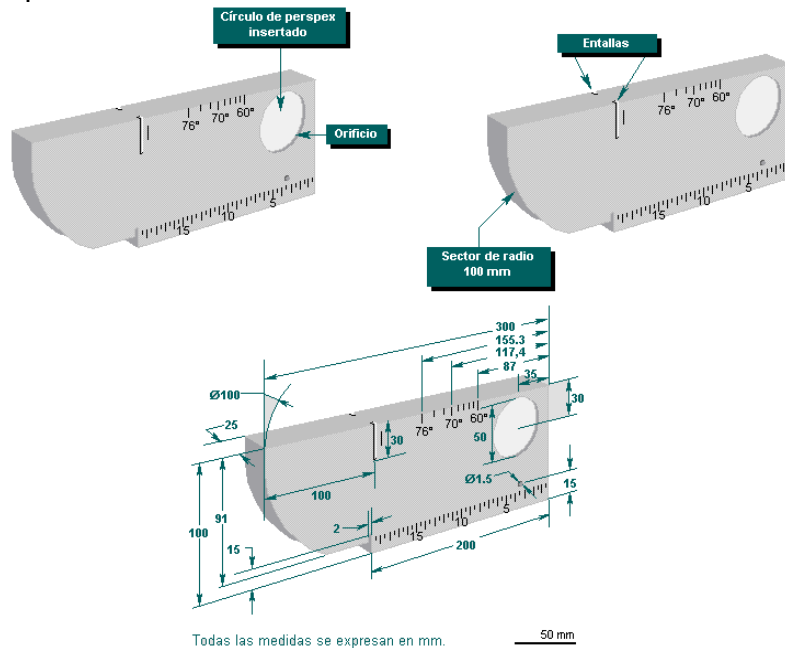
Figura 62. Bloque de Acero



*Fuente: Tomado de [12].

3.5.5.4 Bloque IIW V1. Este bloque puede ser hecho de acero o cualquier otro material que se requiera, cuenta con un círculo de perspex ubicado en el orificio con diámetro 50mm, y se caracteriza por las entallas laterales que se corresponden con el centro del sector de R=100mm, con el que se obtienen sucesiones de ecos de la superficie circular.

Figura 63. Bloque IIW V1



*Fuente: Tomado de [12].

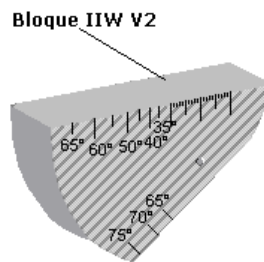
Su diseño permite realizar diferentes tipos de pruebas y calibraciones del equipo ultrasónico, como son por ejemplo:

- Calibración de la base de tiempos con palpador normal.
- Calibración de la base de tiempos con palpador angular.

- Comprobación de la linealidad vertical.
- Comprobación de la linealidad horizontal.
- Comprobación del punto de salida del haz ultrasónico en palpadores angulares.
- Comprobación del ángulo del haz ultrasónico en palpadores angulares.
- Comprobación del poder de resolución (longitudinal).
- Definición de la penetración máxima del haz.

3.5.5.5 Bloque IIW V2. Al igual que el bloque V1, puede estar hecho de acero o cualquier otro material. Se emplea principalmente para la calibración de la base de tiempos cuando se emplean transductores angulares no mayores de 8x9mm.

Figura 64. Bloque IIW V2



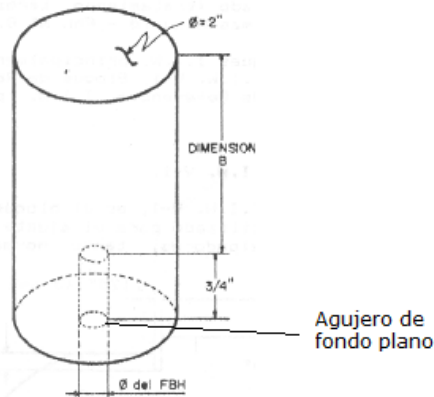
*Fuente: Tomado de [12].

También permite comprobar el ángulo real del haz ultrasónico, de la misma manera que se hace con el bloque V1, que utiliza las reflexiones del haz en el orificio de 5mm taladrado en el bloque.

Este bloque no tiene entalla en el centro de los dos sectores de radios 25 y 50 mm, lo cual permite que independientemente de la superficie a la que se envíe el haz, también se obtendrá el eco de reflexión de la otra.

3.5.5.6 Bloques ASTM. Consisten en una combinación de bloques de calibración área-amplitud y distancia-amplitud, diseñados según la norma ASTM E-127. Son cilíndricos, están hechos de aluminio o acero, y tienen en el centro de sus bases un orificio de fondo plano. Cada bloque está identificado con dos números; uno corresponden al diámetro del orificio (expresado en sesentaicuatroavos de pulgada) y el otro a la distancia entre la superficie externa y el orificio de fondo plano (recorrido del haz) en centésimas de pulgada.

Figura 65. Bloque ASTM E-127



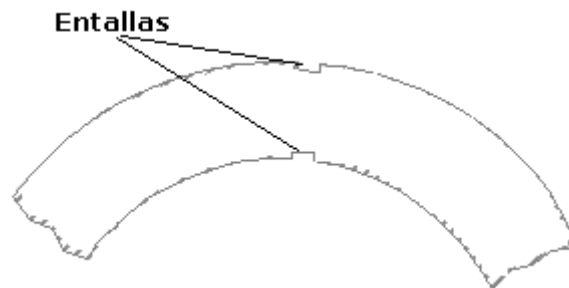
*Fuente: Tomado de [9]

3.5.5.7 Otros tipos de bloques. Este grupo de bloques, está conformado por piezas de referencia que tienen características geométricas y estructurales similares a las de las piezas a inspeccionar. Cuentan con discontinuidades artificiales como orificios o entallas que representan los posibles defectos que se pueden encontrar realmente en una pieza.

Estos bloques brindan la posibilidad de construir cada caso específico de acuerdo a las necesidades de inspección ultrasónica que se requiera. Por esto, permiten hacer una calibración adecuada del control de sensibilidad.

En la figura, se muestra un bloque típico para la inspección de piezas forjadas huecas, en el que se han hecho entallas "U" y "V" en sus superficies interna y externa.[12]

Figura 66. Bloque especial para inspección de piezas forjadas

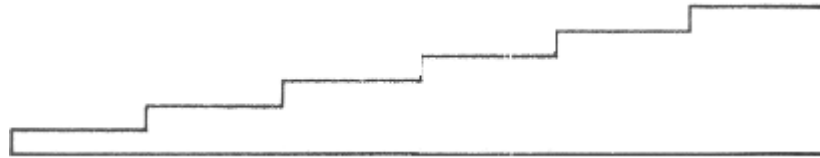


*Fuente: Adaptado de [12].

Bloque escalonado. Diseñado en forma de escalerilla, permite la calibración de palpadores normales, sobretodo palpadores emisor-receptor para la

medición de espesores. Se encuentran en diferentes medidas y por igual en el sistema métrico inglés o en el sistema métrico decimal.

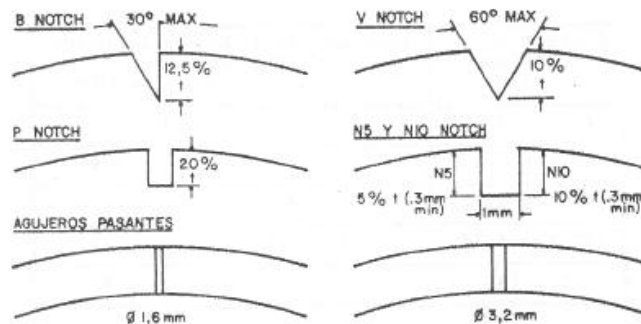
Figura 67. Bloque escalonado



*Fuente: Tomado de [9]

Calibración Según A.P.I. 5L. El Instituto Americano del Petróleo (A.P.I. - American Petroleum Institute), define una serie de discontinuidades artificiales que deben ser creadas en un bloque del mismo material para elaborar un patrón de referencia. Por ejemplo: la especificación API 5L (especificación para tubería de línea), en su sección 9 (ensayos no destructivos), establece que la calibración de los equipos ultrasónicos debe ser efectuada mediante estándares de referencia fabricados partiendo de trozos del mismo material en los que se crean discontinuidades artificiales, como las mostradas en la Figura 68. [9]

Figura 68. Discontinuidades artificiales a crear en un estándar de referencia según API 5L



*Fuente: Tomado de [9]

4. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ULTRASONIDOS

El ensayo no destructivo mediante ultrasonido se puede efectuar utilizando varios métodos y empleando diferentes técnicas de ensayo. En la sección *fundamentos de ensayos no destructivos con ultrasonido* del presente documento, se han definido previamente algunos de los métodos y técnicas existentes para inspección de discontinuidades en materiales metálicos. A continuación se profundiza en cada uno de estos procedimientos.

4.1 MÉTODOS DE ENSAYO

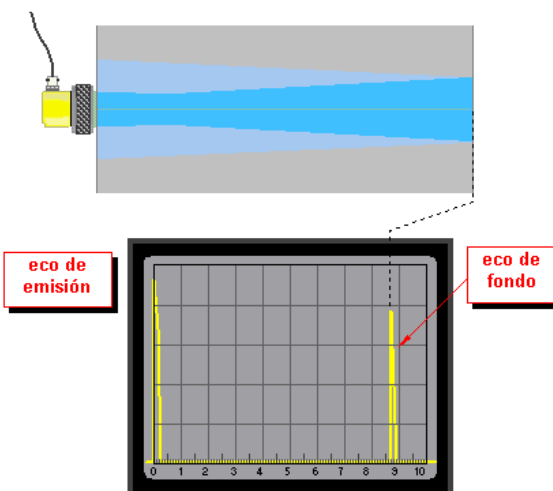
El método de ensayo indica el principio en el que se basa la detección de discontinuidades, de esta forma se tienen tres métodos:

4.1.1 Método De Pulso-Eco

Este método comprende el uso de un transductor simple, que actúa como transmisor y receptor de las ondas ultrasónicas.

Cuando existe una discontinuidad en la pieza a evaluar, aparecerán en la pantalla las señales de reflexión del haz ultrasónico que indican la presencia de la discontinuidad. Si no hay presencia de estas señales la pieza no tiene defectos tal como se observa en la figura 69.

Figura 69. Elemento sin defectos



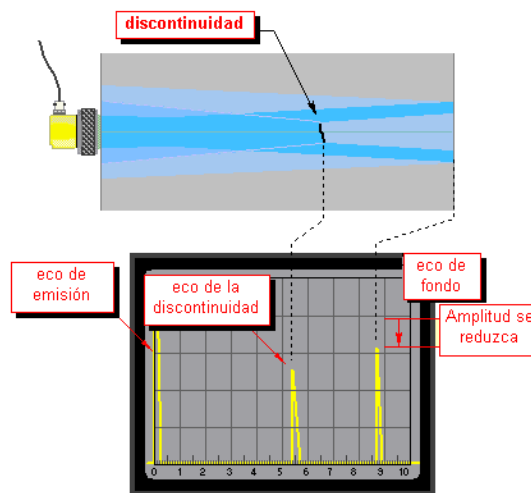
*Fuente: Tomado de [12]

El grupo de ondas (eco de emisión) enviado a la pieza se refleja en la superficie del fondo, o en la superficie de cualquier discontinuidad, y las señales que regresan (ecos) son captadas por el transductor y representadas en la pantalla. Si el transductor está acoplado a una pieza que no tiene discontinuidades, aparecerán únicamente en la pantalla dos ecos:

- El eco de emisión.
- El eco producido por la reflexión del haz en la pared opuesta de la pieza (eco de fondo).

En la Figura 70 se observa la presencia de una discontinuidad en el recorrido del haz ultrasónico, la cual crea una reflexión de la parte del haz que se encuentra con el defecto. La porción que no ha resultado interceptada continuará su viaje hacia la superficie del fondo de la pieza, donde se reflejará nuevamente. El regreso de las ondas reflejadas en el defecto dará lugar a un pico en la pantalla, entre el eco de emisión y el eco de fondo, que representa el eco de la discontinuidad.

Figura 70. Representación Pulso-Eco



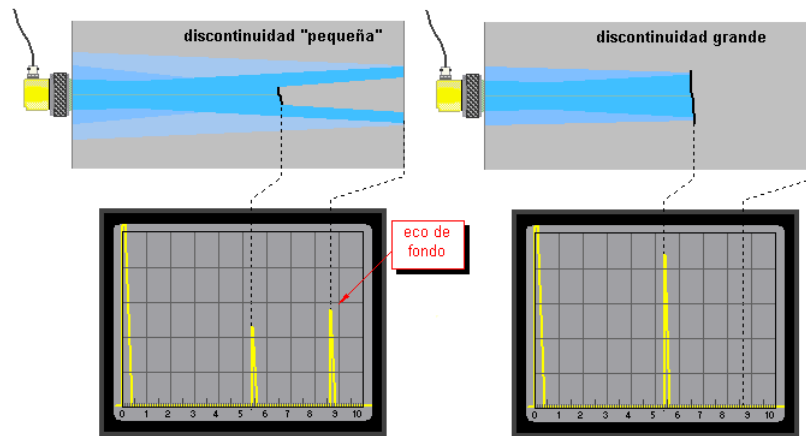
*Fuente: Adaptado de [12]

La porción del haz que es reflejada por el fondo de la pieza al ser más pequeña origina que la amplitud del eco correspondiente se reduzca comparada con la de las piezas de ensayo sin discontinuidades, esto se puede observar al comparar la amplitud del eco de fondo de la Figura 69 y la Figura 70.

La señal correspondiente al eco de fondo aparecerá en la pantalla sólo si la discontinuidad no intercepta completamente el haz incidente; esta situación ocurre cuando la discontinuidad es pequeña o, mejor aún, cuando es menor que la sección recta del haz. En el caso de una discontinuidad grande (mayor que el propio haz) el haz se refleja totalmente y no aparecerá eco de fondo en

la pantalla (una discontinuidad grande también ocultará todas las pequeñas situadas entre ella misma y el fondo) (Ver Figura 71).

Figura 71. Variabilidad del eco de fondo



*Fuente: Adaptado de [12]

A continuación en la Figura 72, se presentan ejemplos de otros casos posibles de reflexión [12]:

Caso a) El reflector es pequeño en relación con la sección del haz; la pantalla mostrará el eco del reflector y el eco de fondo.

Caso b) Para dos reflectores de menor tamaño que la sección recta del haz; la pantalla mostrará tres ecos, dos de ellos son de los reflectores y el tercero es del eco de fondo.

Caso c) Cuando hay dos reflectores, pero el que está más cerca del transductor es mayor que el haz; la discontinuidad mayor reflejará completamente el haz de manera que ni el eco del defecto más pequeño ni el eco de fondo aparecerán en la pantalla.

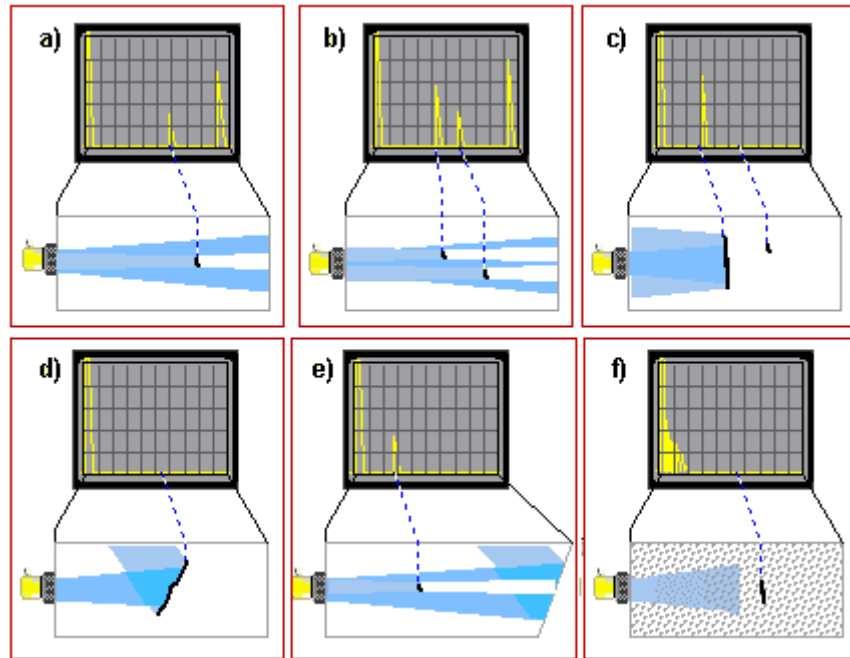
Caso d) Un reflector, mayor que el haz, inclinado un ángulo tal que no se refleje; no aparecerá eco en la pantalla.

Caso e) El reflector es más pequeño que la sección recta del haz y la superficie del fondo de la pieza de ensayo está inclinada respecto del eje del haz; sólo aparecerá en la pantalla el eco reflejado por el defecto ya que el fondo refleja el haz con un ángulo que el transductor no puede recibirle.

Caso f) La pieza tiene una estructura porosa gruesa con una discontinuidad a una cierta distancia de la superficie de ensayo, el material de la pieza difunde el haz, que llega atenuado a la discontinuidad y al fondo de la pieza;

aparecerán en la pantalla detrás del pulso inicial muchos ecos agrupados ocasionados por el material poroso de la pieza, mientras que los ecos de la discontinuidad y del fondo no aparecerán en la pantalla.

Figura 72. Ecos posibles de reflexión

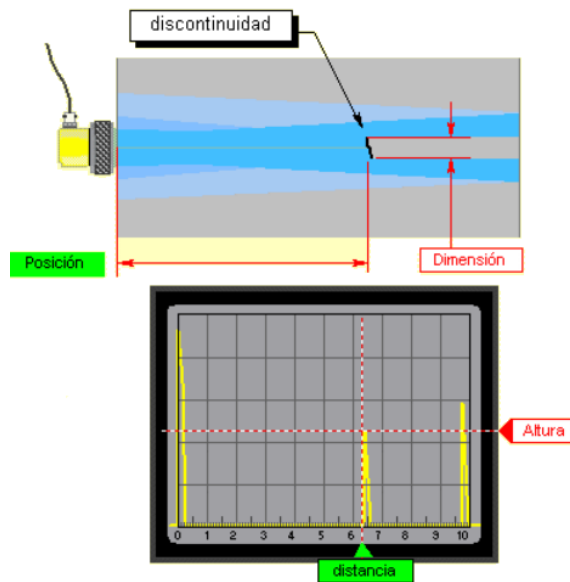


*Fuente: Adaptado de [12]

De esta forma se observa que la señal que representa el eco del defecto, además de revelar la existencia de la discontinuidad, revela información sobre su posición y su dimensión.

En la Figura 73, La posición de la señal en la pantalla indica la distancia de la discontinuidad al transductor, mientras que la altura de la señal ayuda a deducir su forma y extensión.

Figura 73. Posición y dimensión de una discontinuidad por el método de pulso-eco



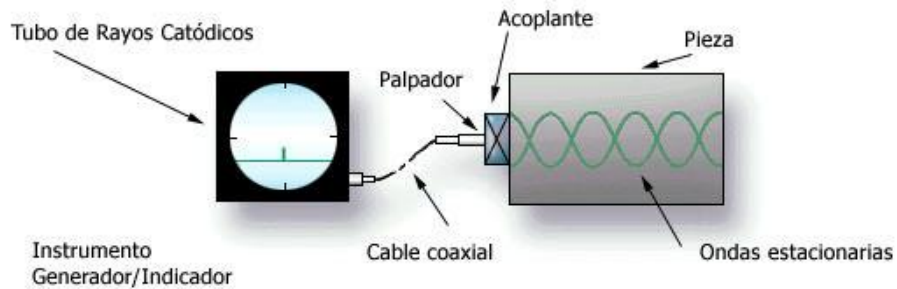
*Fuente: Tomado de [12]

Para interpretar adecuadamente la información, los instrumentos deben estar preparados y calibrados adecuadamente, en secciones anteriores del presente documento se describe el procedimiento de calibración del mismo.

4.1.2 Método de resonancia

El método de resonancia se utiliza en piezas con superficies opuestas paralelas buscando que la frecuencia emitida por el palpador entre en resonancia con la pieza y comience a vibrar con oscilaciones particularmente amplias (formación de ondas estacionarias). A continuación, la vibración se transmite de regreso al transductor al que está acoplada la pieza, y entonces se analiza la información obtenida. En la pantalla del equipo aparecerá un pico agudo que permite que se vea con claridad la magnitud de la resonancia (ver Figura 74).

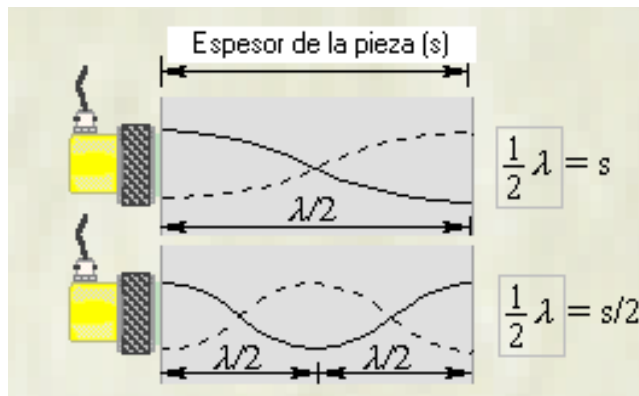
Figura 74. Eco de resonancia.



*Fuente: Tomado de [24]

En el método de resonancia, se excita el transductor con una corriente alterna de voltaje variable para que éste propague un haz ultrasónico de amplio espectro de frecuencias (y por tanto de longitud de onda variable); de esta forma, las oscilaciones cuya longitud de onda sea un múltiplo del espesor de la muestra, se reforzarán al superponerse en fase, debilitando las restantes, dando lugar al fenómeno de resonancia (formación de ondas estacionarias). Así, las oscilaciones características se podrán definir por el número de semilongitudes de onda contenidas en el espesor de la muestra (ver Figura 75)

Figura 75. Relación espesor-longitud de onda



*Fuente: Adaptado de [12]

Cuando no hay discontinuidades en la pieza del ensayo, la frecuencia (o un múltiplo de ella) a la que se produce resonancia es la descrita por la ecuación 21.

$$f_r = \frac{V}{2 \cdot S} \quad (21)$$

Donde:

S= espesor de la pieza;

V= velocidad longitudinal de los ultrasonidos a través del material.

Si la pieza tiene una discontinuidad a una profundidad de la superficie, también hay resonancia cuando $\lambda/2$ es igual a (o submúltiplo de) esta profundidad.

Una vez detectada, la profundidad de la discontinuidad que genera resonancia con una frecuencia fundamental f_{r_0} es:

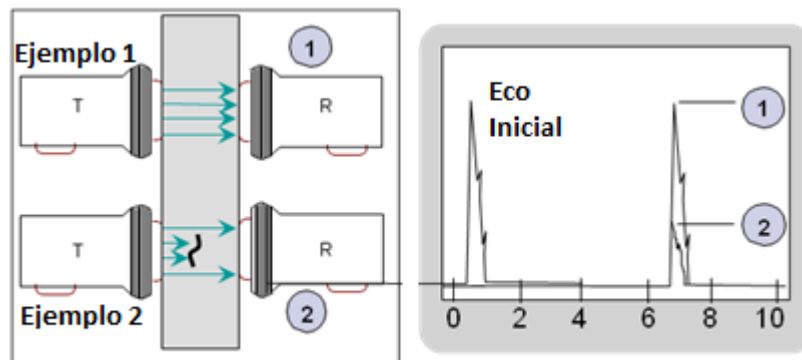
$$d = \frac{V}{2f_{r_0}} \quad (22)$$

Donde V es la velocidad longitudinal a través del material.

4.1.3 Método de transmisión

Este método requiere dos transductores, uno que actúa como emisor (T) y otro como receptor (R) del haz ultrasónico tal como se observa en la Figura 76.

Figura 76. Método de transmisión



*Fuente: Adaptado de[11]

La indicación de una discontinuidad en la pieza viene dada por una reducción de la señal que recibe el transductor-receptor comparado con los casos en los

que no hay defecto. De esta forma se observa en la Figura 76 ejemplo 1 que no hay discontinuidades, luego el eco de fondo es igual o similar al eco inicial, en el ejemplo 2, la amplitud del eco disminuye evidenciando la existencia de una discontinuidad.

Entre las diferentes formas de aplicar este metodo se encuentra:

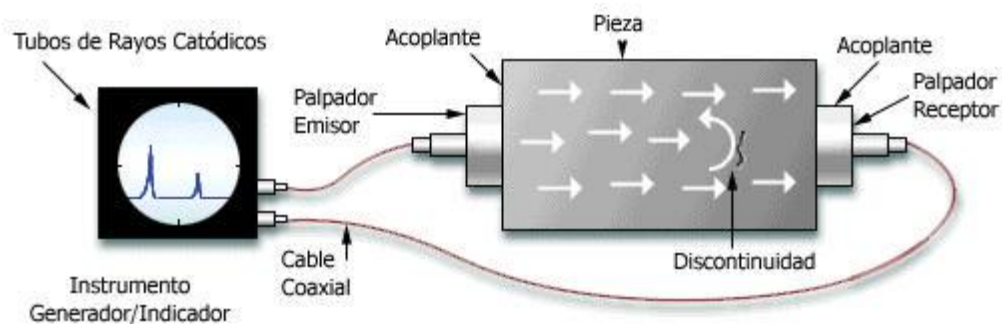
- Transmisión directa
- Reflexion
- Conducción

El principio de detección es el mismo en los tres casos, pero la posición de los transductores sobre la superficie de la pieza es diferente.

4.1.3.1 Método de transmisión directa:

Los dos transmisores (transmisor y receptor) están situados uno frente al otro en las dos superficies opuestas de la pieza. Si el haz emitido por el transmisor encuentra una discontinuidad en su recorrido, se refleja parcialmente. Por lo tanto la porción transmitida del haz queda debilitada y el receptor recibe una amplitud reducida comparada con los casos en los que no hay defectos. La señal débil indica la presencia de una discontinuidad como se observa en la Figura 77.

Figura 77. Método de transmisión directa



*Fuente: Tomado de [24]

De la reducción de la amplitud se puede deducir el diámetro equivalente de la discontinuidad, pero no se puede determinar ni la amplitud ni su forma.

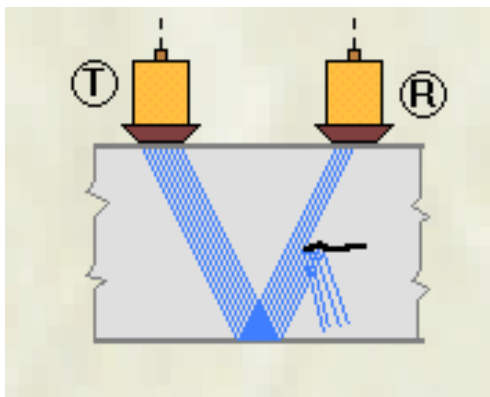
4.1.3.2 Método de transmisión con reflexión

En el método de transmisión con reflexión los dos transductores se posicionan en el mismo lado del material a evaluar y se utiliza cuando no es posible ubicar los palpadores en superficies opuestas. (Figura 78)

Se observa en la Figura 78 que el debilitamiento de la señal que recibe el receptor indica la presencia de una discontinuidad en el recorrido del haz a través de la pieza de ensayo de la cual se puede deducir el diámetro equivalente de la discontinuidad a partir de la magnitud de la reducción, pero no su profundidad ni su forma.

En el método de transmisión con reflexión se mide la reducción del eco de fondo, mientras que en la técnica de pulso-eco el eco del defecto proporciona información sobre las características del reflector (discontinuidad).

Figura 78. Método de transmisión con reflexión



*Fuente: Tomado de [12]

4.1.3.3 Método de transmisión con conducción:

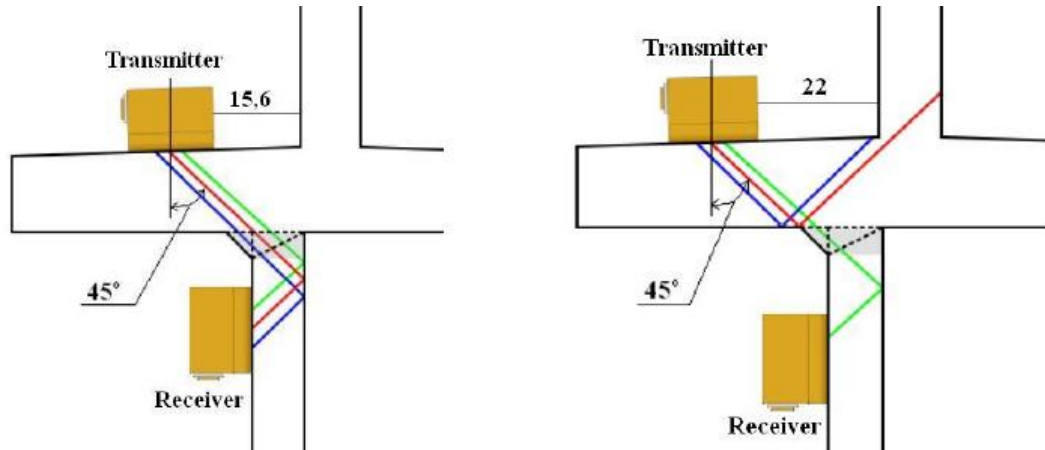
El método de transmisión con conducción se puede considerar como una extensión del método de reflexión. Se aplica en casos de piezas con geometría compleja que no sean muy gruesas, donde sería imposible hallar el recorrido exacto del haz debido a las numerosas e impredecibles reflexiones que experimentaría (Figura 79).

Cualquier variación de la señal recibida (reducción en amplitud y/o desplazamiento) comparada con la señal de una misma pieza sin defectos, indica que el haz ha encontrado una discontinuidad en su recorrido a través de la pieza.

Esta técnica tiene la limitación de que los palpadores deben estar correctamente localizados ya que el haz puede reflejarse (Figura 79) y de

esta forma la señal recibida en el receptor produciría análisis de datos erróneos como indicaciones falsas de discontinuidad.

Figura 79. Método de transmisión con conducción



a) Palpadores correctamente localizados

b) palpadores localizados de forma incorrecta

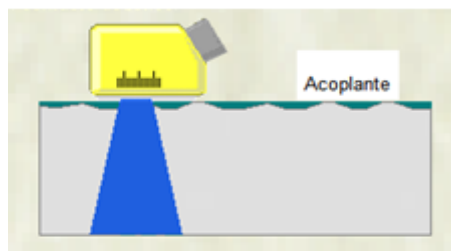
*Fuente: Tomado de [25]

4.2 TÉCNICAS DE ENSAYO

“El término técnica de ensayo se refiere al sistema usado para realizar el acoplamiento acústico entre el transductor y la pieza a ensayar”[12]

Antes de tratar las TÉCNICAS de ensayo, se debe recordar que el aire no es un buen medio para la transmisión de ondas ultrasonicas. Además, debido a la diferencia de impedancia acustica entre el aire y la mayor parte metales, aún una capa delgada de aire puede ser un obstáculo serio para la transmisión de los ultrasonidos entre el transductor y la pieza a ensayar. Es por esto que para asegurarse que los ultrasonidos se transmiten de manera eficaz, un material adecuado (acoplante) que sustituya completamente al aire debe interponerse entre la superficie de emisión del transductor y la superficie de la pieza a evaluar. (Figura 80)

Figura 80. Técnica de ensayo



*Fuente: Autores

Existen dos técnicas generales de ensayo no destructivo:

- Técnica de inmersión
- Técnica de contacto

4.2.1 Técnica de contacto:

En la técnica de contacto, el palpador se desliza sobre la superficie de la pieza una vez que ésta se ha recubierto con una capa delgada y uniforme de un medio de acoplamiento adecuado (ver Figura 80).

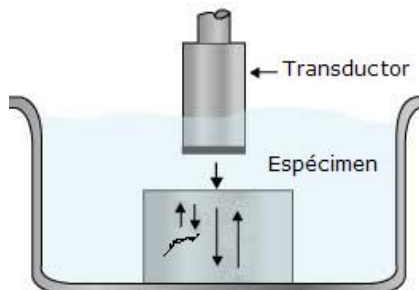
La técnica se usa en la casi totalidad de los ensayos manuales, donde el operador realiza el ensayo desplazando manualmente el palpador ya sea normal a la superficie o utilizando un palpador angular. La aplicaciones de la técnica de contacto requiere un examen cuidadoso de las condiciones de la pieza a ensayar. Los principales factores que se deben analizar son:

- Rugosidad
- Presencia de pintura o recubrimientos
- Presencia de capas de oxido
- Presencia de depresiones o entallas

4.2.2 Técnica de inmersión

La técnica de inmersión se aplica normalmente en ensayos automatizados, en series o en casos en los que un gran número de piezas tienen la misma geometría (ensayo de tubos o piezas metálicas de diámetro pequeño) o en el ensayo de piezas donde no sea adecuada la técnica de contacto.

Figura 81. Técnica de Inmersión

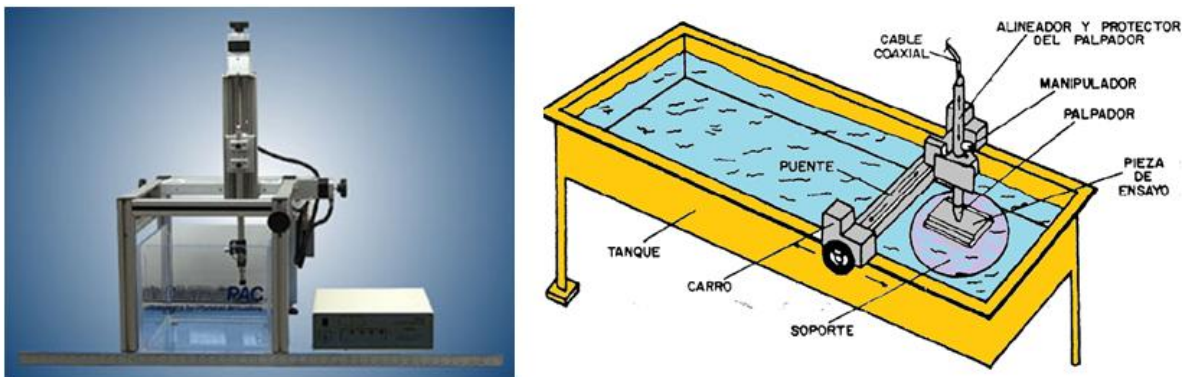


*Fuente: Tomado de [26]

Con la técnica de inmersión el transductor y la pieza a ensayar están sumergidos en el acoplante. Éste está compuesto habitualmente por una mezcla con agua ya que el agua garantiza un buen acoplamiento ultrasónico cuando el transductor está alejado de la pieza a ensayar, es importante que el agua contenga agentes antioxidantes, anticorrosión y que no contengan burbujas para la realización de la prueba.

En el sistema estandar de inmersión , el transductor y la pieza a ensayar se sumergen en tanques equipados con un sistema como el de la Figura 82, para explorar la pieza de manera automatica. En algunos sistemas la pieza se mueve, en otros permanece quieta (o a veces gira sobre su eje) y el transductor se mueve para explorar la pieza.

Figura 82. Tanque de Inmersión



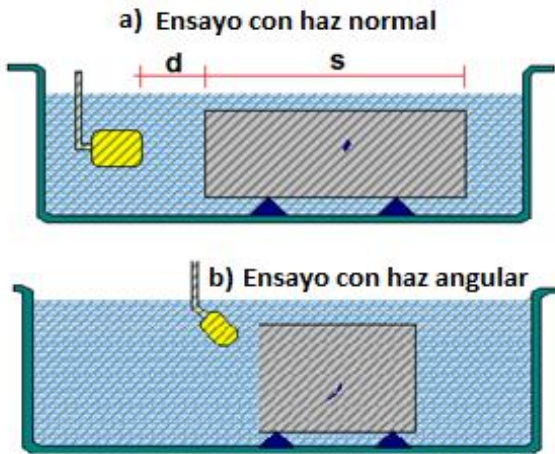
*Fuente: Adaptado de [9] [27]

Algunos sistemas especiales (con palpadores de columna de agua) se usan cuando las piezas, por diferentes razones, no se pueden llevar a los tanques.

Los ensayos en inmersión, al igual que los de contacto, pueden ser de dos tipos, dependiendo del ángulo que forma el haz con la superficie a ensayar (Figura 83).

- Ensayo con haz normal: El eje del haz de ultrasonido es perpendicular a la superficie de ensayo (ángulo de incidencia es cero)
- Ensayo con haz angular: El eje del haz de ultrasonidos forma un ángulo, que no es perpendicular, con la superficie de ensayo (ángulo de incidencia diferente de cero).

Figura 83. Ensayo de haz normal y angular

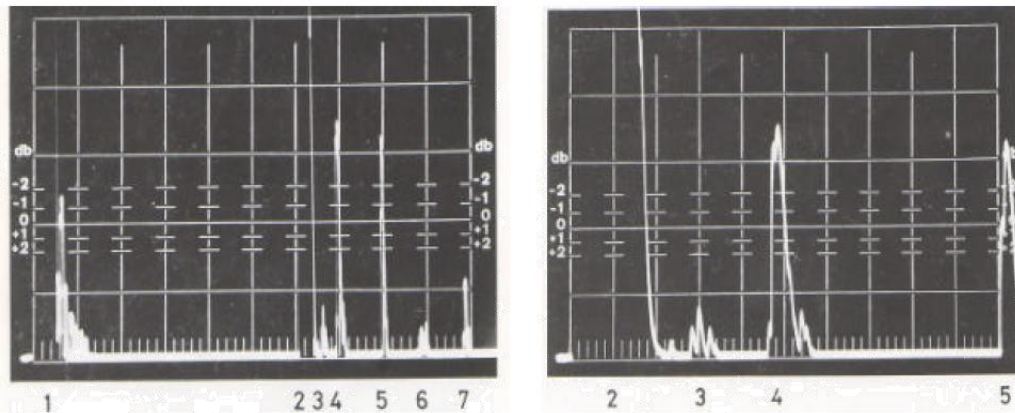


*Fuente: Autores

4.2.2.1 Ensayo con haz normal: El ensayo de inmersión con haz normal (eje del haz perpendicular a la superficie de la pieza) presenta un ecograma completamente distinto comparado con el de la técnica de contacto. (Figura 84)

Las diferencias se deben a la reflexión parcial que experimenta el haz en la interfase representada por la superficie delantera y posterior del material. Como consecuencia, los ecos se dispersan y una serie de ecos equidistantes de la interfase aparecen en la pantalla, relativos al recorrido de las ondas sonoras en el agua. Cada eco va seguido de una serie de ecos de discontinuidad y de fondo producidos por el haz que viaja a través de la pieza de ensayo.

Figura 84. Ecos de Inmersión



*Fuente: Tomado de [21]

En la Figura 84 los ecos representan:

- 1) Eco de emisión del transductor.
- 2) Eco de la superficie de entrada (interfase líquido-material).
- 3) Eco del defecto.
- 4) Primer eco de fondo (el haz llega a la pared posterior y retorna).
- 5) a 7) Segundo a cuarto eco de fondo (El haz nuevamente viaja por el material ya que se refleja por la superficie).

Para localizar las discontinuidades es importante conocer la distancia "d" (ver Figura 83) a la que el transductor se sitúa respecto de la pieza, del modo que aparezcan en la pantalla un cierto número "n" de ecos de fondo. Esta distancia se puede calcular, utilizando la expresión que se muestra en la ecuación 23:

$$d = n * s * \frac{v_a}{v_m} \quad (23)$$

Donde v_a y v_m son las velocidades longitudinales del haz en el agua y en la pieza a evaluar respectivamente; y s es el espesor de la pieza.

Por ejemplo, en el caso de una pieza de acero ($v_m = 4v_a$), para tener 4 ecos de fondo ($n=4$) la distancia entre el transductor y la pieza será aproximadamente igual al espesor de la pieza (resultado de utilizar la ecuación 23)

4.2.2.2 Ensayo con haz angular: En el caso de ensayo con haz angular, la interfase agua-pieza del ensayo también da lugar a que los ecos se dividan pero, a diferencia con la técnica del haz normal, aquí no hay ecos de interferencia ya que el haz no se refleja en el sentido del transductor, es decir no se producen ecos de fondo múltiple como los ecos 5 a 7 de la Figura 84.

4.2.3 Técnicas por amplitud y difracción del haz ultrasónico

Existen otras técnicas aplicadas de acuerdo a las propiedades físicas del haz ultrasónico y de comparación con estándares o patrones de referencia, estas técnicas han sido desarrolladas por organismos internacionales que desarrollan las normas con los procedimientos a seguir. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran:

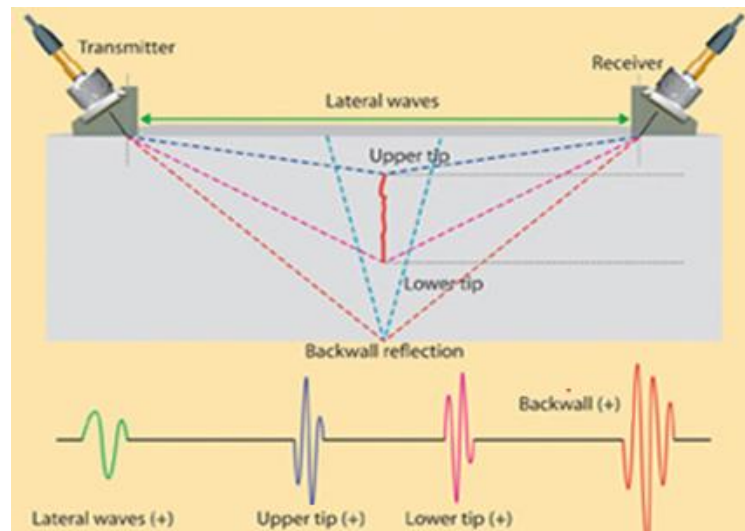
- Técnica por Difracción en el Tiempo de Vuelo (TOFD)
- Técnica de Comparación de Amplitudes (ACT)
- Técnica diferencial de distancia-amplitud (ADDT)

4.2.3.1 Técnica por Difracción en el Tiempo de Vuelo (TOFD)

Otro método para determinar localización y tamaño de discontinuidades es la definida en la norma ASTM¹¹ E2373-09 Standard Practice for Use of the Ultrasonic Time of Flight Diffraction (TOFD) Technique. La cual se basa en la propiedad de difracción del sonido. Sabiendo que la difracción se define como la dispersión o redirección de ondas cuando pasan a través de una abertura o alrededor de una barrera u obstáculo u otra no-homogeneidad en un medio, diferente a la producida por reflexión o refracción [28].

Este método utiliza dos transductores, uno transmisor y otro receptor con ondas longitudinales de ángulos de 45° a 70° como se observa en la Figura 85, donde el haz ultrasónico incide en una discontinuidad lineal, en el que ocurre además de la reflexión normal el fenómeno conocido como difracción. Esta energía difractada se emite en un rango angular bastante amplio y se asume que se origina en las extremidades de la falla. Este método es totalmente diferente de las técnicas convencionales de ultrasonido, las cuales se basan en la cantidad de energía reflejada por las discontinuidades.

Figura 85. Técnica TOFD



*Fuente: Tomado de [29]

En la Figura 86 se observa que, mientras que con la técnica pulso eco solo se analiza una pequeña parte, con la técnica TOFD se puede explorar de forma amplia el material en una sola prueba.

Además de las energías difractadas por los defectos. El método "TOFD" utiliza una onda superficial (lateral) que viaja directamente de transductor a

¹¹ ASTM American Society for Testing and Materials. Organismo internacional

transductor y también envía un eco hacia la pared posterior del material evaluado donde no se presente interferencia de defectos.

El resultado de un ensayo TOFD se muestra en la parte inferior de la Figura 85, donde la señal ofrecida por la pantalla del instrumento corresponde a:

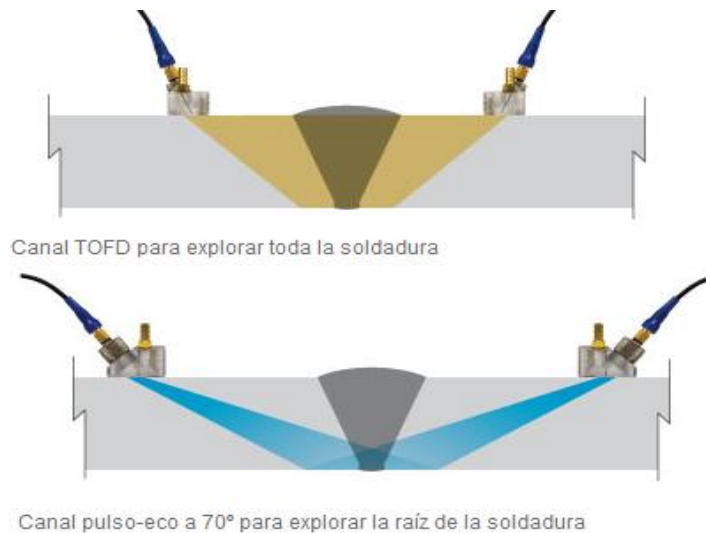
- El Primer Eco (verde) es la Onda Lateral del haz.
- El Segundo Eco (azul) es la difracción en la parte superior de la discontinuidad.
- El Tercer Eco (Magenta) es la difracción de la parte inferior de la discontinuidad.
- El Cuarto Eco (Rojo) es la reflexión de la pared posterior.

Esta técnica aplica principalmente para:

Detectar Fallas producto del registro de las señales reflejadas por las discontinuidades.

Determinar tamaño de la falla ya que la separación en el tiempo de las ondas difractadas está directamente relacionada al tamaño de la discontinuidad.

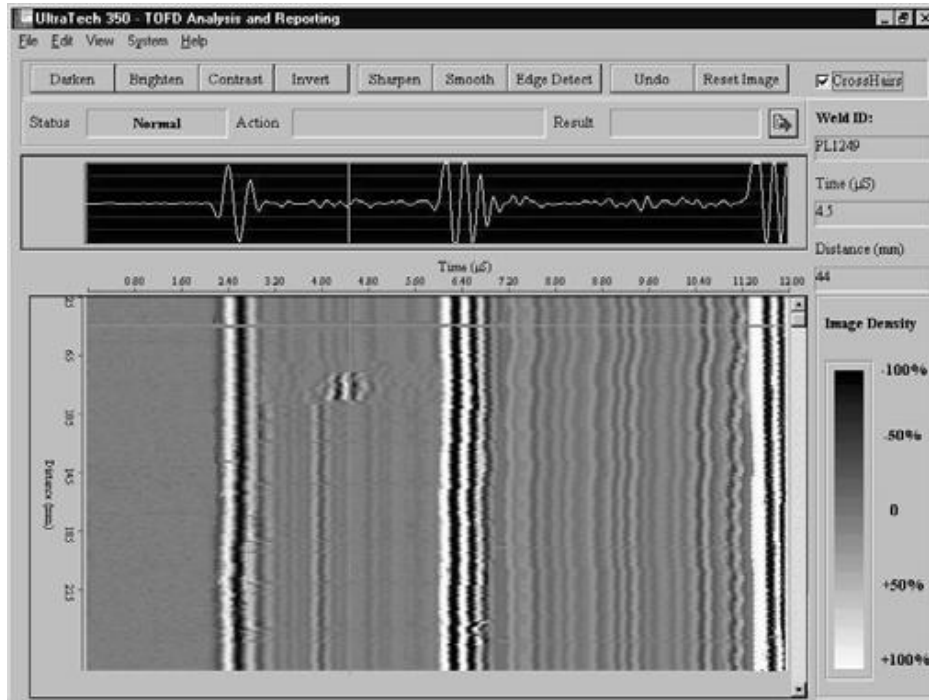
Figura 86. Comparación TOFD-Pulso Eco



*Fuente: Tomado de [30]

Las señales difractadas las detecta el transductor receptor y se evalúan en la representación de datos en pantalla Tipo-B como se observa en la Figura 87.

Figura 87. TOFD representación de datos Tipo-B



*Fuente: Tomado de [31]

4.2.3.2 Técnica de Comparación de Amplitudes (ACT)¹²:

Esta técnica de evaluación ultrasónica compara las señales reflejadas entre un indicador de referencia de profundidad radial conocida (patrón de referencia tubular similar en características al tubo a inspeccionar) y una imperfección de la pieza a evaluar.

Las pruebas empíricas han probado, que cuando se aplica esta técnica (ACT) para determinar el tamaño de imperfecciones radiales en productos tubulares, la exactitud puede variar, debido a varios factores, entre los cuales están, la condición de la superficie de entrada del material, la forma, la orientación y rugosidad superficial de la imperfección.

4.2.3.3 Técnica Diferencial de Distancia-Amplitud (ADDT)

El método más reciente aprobado por el API¹³ para la determinación del tamaño de discontinuidades es conocido como la Técnica Diferencial de Distancia Amplitud (*Amplitude Distance Differentia Tecnique ADDT*). Este método se describe en la norma API RP 5UE. Recommended Practice for

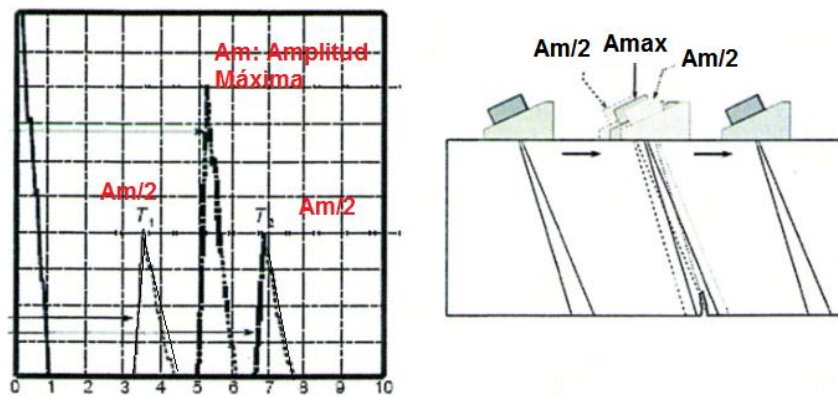
¹² Esta técnica se profundizará en la sección de normas, en la práctica recomendada para evaluación ultrasónica de imperfecciones en tubería API RP 5UE.

¹³ API American Petroleum Institute, Organismo internacional.

Ultrasonic Evaluation of Pipe Imperfections , Second Edition, (2009) que se analizará a profundidad en un próximo capítulo.

La técnica diferencial de distancia-amplitud (ADDT) compara la distancia y amplitud en niveles del 50% del pico de amplitud del ultrasonido entre un estándar de referencia de profundidad radial conocida y una imperfección. A medida que el palpador se mueve, establece que cuando la amplitud del pulso inicial disminuye a la mitad se obtiene la posición de una orilla de la imperfección, se sigue repitiendo el movimiento hasta obtener nuevamente la mitad de la amplitud y obtener el otro extremo de la imperfección tal como se observa en la siguiente figura:.

Figura 88. Técnica Diferencial de Distancia-Amplitud (ADDT)



*Fuente: Tomado de [32]

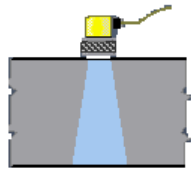
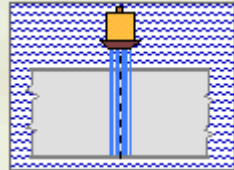
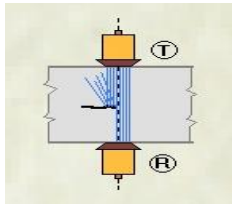
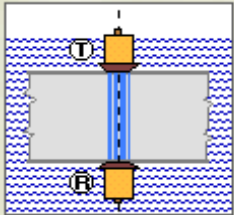
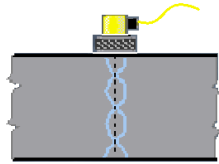
Para una explicación más detallada, ver la sección de la práctica recomendada API RP 5UE en el capítulo de normatividad en ensayos no destructivos.

4.3 COMPARACIÓN DE TÉCNICAS Y MÉTODOS DE ENSAYO

Cuando se efectúa un ensayo ultrasónico se tienen que especificar el método de detección y la técnica de acoplamiento seleccionada (por ejemplo: método de pulso eco con técnica de inmersión, método de transmisión con la técnica de contacto, etc.)

De esta forma el método típico de pulso eco y el método de transmisión se pueden usar con las técnicas de acoplamiento. El método de resonancia, por otra parte, solo se puede usar con la técnica de contacto. En la Tabla 6 se aprecia la comparación entre técnica y método de ensayo no destructivo con ultrasonido.

Tabla 6. Comparación de técnicas y métodos de ensayo

Técnica Método	Contacto	Inmersión
Pulso-eco		
Transmisión		
Resonancia		No aplica

*Fuente: Adaptado de [10]

Sin embargo hay que recordar que existen otras técnicas que se aplican de acuerdo a las propiedades físicas del haz ultrasónico y de comparación con estándares o patrones de referencia como son:

- Técnica por difracción en el tiempo de vuelo (TOFD).
- Técnica de comparación de amplitudes (ACT).
- Técnica diferencial de distancia-amplitud (ADDT).

5. NORMATIVIDAD EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ULTRASONIDOS

5.1 NORMALIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN

La normalización o estandarización se refiere a la redacción y aprobación de normas que se establecen para garantizar el acoplamiento de elementos contruidos independientemente, así como garantizar el repuesto en caso de ser necesario, garantizar la calidad de los elementos fabricados y la seguridad de funcionamiento. La normalización es el proceso de elaboración, aplicación y mejora de las normas que se aplican a distintas actividades científicas, industriales o económicas con el fin de ordenarlas y mejorarlas [33]

Según el Icontec (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación), la normalización, puede definirse como; la actividad que establece, con respecto a problemas reales o potenciales, disposiciones para uso común y repetido, encaminadas al logro del grado óptimo de orden en un contexto dado [34]

La normalización posee fundamentalmente tres objetivos [33]:

- Simplificación: Se trata de reducir los modelos y procedimientos ajustándose únicamente a los más necesarios.
- Unificación: Mismos procedimientos a nivel internacional.
- Especificación: Se busca evitar errores de identificación creando un lenguaje claro y preciso.

5.1.1 Principales organismos reguladores de normas en ensayos no destructivos.

Existen organismos e instituciones internacionales cuya función es la creación, edición y regimiento de normas técnicas y estándares, que regulan gran cantidad de actividades y procedimientos existentes en la industria actual.

Algunos de estos organismos que se relacionan directamente con la evaluación de materiales por medio de ensayos no destructivos son:

5.1.1.1 ASTM. (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales).

La Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (American Society for Testing and Materials) ASTM, es una organización científica y técnica que estudia las características y cualidades de los materiales, productos, sistemas y servicios y así mismo desarrolla las normas relacionadas a las mismas.

La ASTM proporciona una amplia gama de normas y guías prácticas de ensayos no destructivos, los cuales incluyen varios de estándares, procedimientos y métodos.

Para el caso de ensayos no destructivos con ultrasonidos para inspección de tuberías, la norma ASTM - E 213 Standard Practice for Ultrasonic Examination of Metal Pipe and Tubing es la que concierne al presente estudio.

5.1.1.2 API. (Instituto Americano de Petróleos)

El Instituto Americano de Petróleos (American Petroleum Institute), API es la principal institución encargada de realizar las normas que rigen al sector petrolero y del gas natural.

En ensayos no destructivos con ultrasonido para evaluación de tubulares, la norma relacionada es la API RP 5UE. Recommended Practice for Ultrasonic Evaluation of Pipe Imperfections que se analizará en la siguiente sección.

5.1.1.3 ASNT. (Sociedad Americana para Ensayos no Destructivos)

La Sociedad Americana para Ensayos no Destructivos (American Society for Nondestructive Testing) ASNT, es una organización abierta para cualquiera persona interesada en el campo de los ensayos no destructivos END. Dentro de los objetivos que persigue la ASNT se Pueden citar los siguientes [5]:

- Proveer mediante foros el intercambio de la información técnica de END.
- Proporcionar materiales educativos y programas referentes a los END.
- Brindar capacitación, normas y servicio de calificación y certificación del personal que labora en END.
- Promover la disciplina de los END como una profesión.
- Facilitar y promover la investigación y aplicación de la tecnología de END.

Es necesario para la realización de ensayos no destructivos con ultrasonidos contar un personal inspector idóneo que esté entrenado y altamente calificado, que comprenda a cabalidad todo lo concerniente a equipos, técnicas, materiales y procedimientos de ensayo, dicha certificación es otorgada por la ASNT y se rige con la norma ASNT SNT-TC-1A (Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing). De acuerdo a los siguientes niveles de calificación [9]:

- El personal con calificación "Nivel I" debe estar preparado para realizar, según instrucciones escritas, calibración de equipos, ensayos y evaluación de resultados.

- El personal con calificación "Nivel II" debe estar preparado para realizar; calibración de equipos, interpretar y evaluar resultados con respecto a códigos y especificaciones. Debe estar en capacidad de preparar instrucciones escritas y reportar resultados de ensayo.
- El personal con calificación "Nivel III" debe ser responsable de establecer técnicas, interpretar códigos y designar el método de ensayo junto con la técnica a ser usada. Debe tener una gran experiencia práctica en ésta técnica y estar familiarizado con otras técnicas de Ensayo no Destructivo.

5.1.1.4 ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación).

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), es el organismo nacional de normalización de Colombia. Entre sus labores se destaca la creación de normas técnicas y la certificación de normas de calidad para empresas y actividades profesionales.

En lo referente a ensayos no destructivos, no cuenta con una aplicación directamente relacionada con ultrasonidos, sin embargo la norma técnica colombiana NTC 2120 Guía Para La Inspección de Soldadura Mediante Ensayos No Destructivos incluye un apartado de END ultrasónico.

5.1.1.5 SIC (Superintendencia de industria y comercio)

Entre las funciones de la SIC se encuentran [35]:

- Acreditar los organismos de inspección, laboratorios de pruebas y ensayos y laboratorios de calibración a nivel nacional.
- Autorizar las entidades de certificación para prestar sus servicios en el país, de acuerdo con lo previsto en la Ley 527 de 1999 y ejercer respecto de éstas las funciones previstas en dicha ley o en las demás normas que la modifiquen o adicionen.

Actualmente la SIC utiliza varios programas aceptados internacionalmente para la calificación y certificación del personal que realiza END. Estos programas son:

- La Práctica Recomendada SNT-TC-1A, emitida por la ASNT, descrita anteriormente.

- La norma DP-ISO-9712, Non-destructive testing - Qualification and certification of personnel (Ensayos no destructivos. Calificación y certificación de personal).
- La norma NTC 2034. Ensayos no destructivos. Calificación y certificación de personal ésta norma específica la calificación y certificación del personal involucrado en ensayos destructivos (END) y es aplicable a varios métodos de inspección.

Así mismo la SIC puede acreditar a otros entes como certificadores de personal en ensayos no destructivos, bajo el esquema de la norma NTC ISO/IEC 17024 Evaluación de la conformidad. (Requisitos generales para los organismos que realizan la certificación de personas).

5.2 SÍNTESIS DE LAS PRINCIPALES NORMAS EN END EMPLEANDO ULTRASONIDO

A continuación se define la función de cada norma de ensayos no destructivos con ultrasonidos para inspección de tuberías mencionada anteriormente.

5.2.1 ASTM E213 (Procedimiento para Examen Ultrasonico de Tuberías de producción)

La norma ASTM E213 Standard Practice for Ultrasonic Examination of Metal Pipe and Tubing; cubre el procedimiento para la detección de discontinuidades en tuberías de producción, utilizando el ultrasonido con el método de pulso-eco y la técnica de contacto directo o de inmersión de haz angulado.

El método de calibración consiste en discontinuidades artificiales con ranuras de referencias longitudinales.

Esta práctica está diseñada para utilizarse con productos tubulares con diámetros exteriores de aproximadamente 1/2 pulgada (12,7 mm) o superiores, siempre que los parámetros del examen cumplan y satisfagan los requisitos de la Sección 12 de la norma. Estos procedimientos han sido utilizados con éxito para tamaños menores, sin embargo, esta decisión es determinada por acuerdo de las partes interesadas [36].

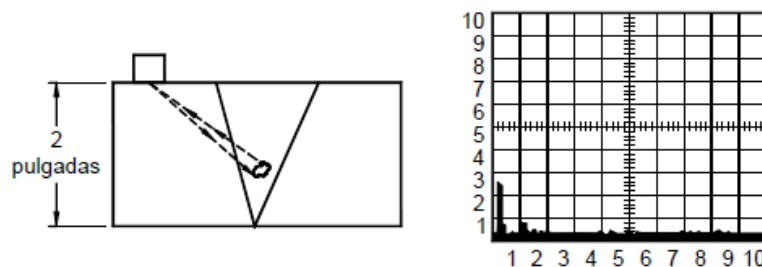
Sin embargo se debe tener precaución al examinar las tuberías menores de 1/2-in (límite especificado). Ya que ciertas condiciones de tamaño, frecuencia, paredes delgadas, y diámetros mínimos podrían causar la generación de pulsos de sonido no deseado que puedan producir resultados erróneos.

5.2.2 NTC 2120 Guía Para La Inspección de Soldadura Mediante Ensayos No Destructivos

Esta guía [7] describe los métodos de ensayo no destructivo más utilizados para inspección de soldaduras y uniones tubulares, en cuanto a pruebas con ultrasonidos la mayor parte de la inspección se realiza con la técnica del haz angulado debido a la dificultad de llegar a algunas áreas a inspeccionar

Durante la inspección es importante que sólo aparezcan discontinuidades sobre la pantalla (ver Figura 89)

Figura 89. Ecos de discontinuidades



*Fuente: Tomado de [7]

Sin embargo, esto no es así porque los límites geométricos de la parte que se está inspeccionando a menudo reflejan el sonido de regreso, tal como lo haría una discontinuidad.

Por lo tanto, se debe tener cuidado al inspeccionar con ultrasonido las juntas con geometría compleja, para cerciorarse de que las señales de ultrasonido sean el resultado de la presencia de discontinuidades, y no simplemente ecos falsos producidos por la reflexión de los laterales de la pieza.

Generalmente, es deseable que el haz de sonido intercepte el plano de la discontinuidad a 90° o cerca a éstos, de modo que la máxima señal reflejada regrese al transductor. No obstante, las grietas que no están orientadas de modo perpendicular al haz de ultrasonido se pueden detectar porque sus superficies no son lisas y el sonido que se refleja es aproximadamente perpendicular al haz.

La superficie de ensayo que se usa para exploración con la unidad de barrido se selecciona con base en la forma y la estructura de la soldadura, y a menudo mediante la accesibilidad para el ensayo. El patrón de exploración debe ser lo suficientemente complejo para hacer pasar el haz de sonido a través de todo el volumen de la soldadura, con el fin de permitir la detección de posibles discontinuidades. Esto justifica la amplia variedad disponible de diferentes

unidades de barrido en ángulos. En casos especiales, se fabrican unidades de barrido, en conformidad con ángulos no estándar.

5.2.3 API RP 5UE: Práctica Recomendada para evaluación ultrasónica de imperfecciones en tubería. [32]

5.2.3.1 PROPÓSITO

La API RP 5UE: Recommended Practice for Ultrasonic Evaluation of Pipe Imperfections describe los procedimientos que se pueden utilizar para evaluar la profundidad o tamaño de las imperfecciones.

Incluidos en esta práctica están los procedimientos recomendados para la evaluación ultrasónica en la inspección de tubería nueva utilizando la Técnica de Comparación de Amplitud (ACT) y la Técnica Diferencial de Distancia-Amplitud (ADDT) para:

- La evaluación de imperfecciones que rompen la superficie en el cuerpo del tubo.
- Imperfecciones superficiales y sub- superficiales en el área de soldadura para la tubería soldada.

5.2.3.2 APLICABILIDAD

Para propósitos de este documento la tubería que se evalúa corresponde a tubería de revestimiento "casing", tubería de producción "tubing" y tubería de perforación "drill pipe". Sin embargo las técnicas contenidas en esta práctica recomendada aplican a toda la tubería sin importar tipo y tamaño.

FACTORES QUE PUEDEN INFLUIR EN LOS RESULTADOS

Cada proceso de inspección y medida está caracterizado por una variabilidad inherente de los resultados. Los resultados de las inspecciones no-destructivas incluidas en esta práctica recomendada son dependientes de la variabilidad inherente de las técnicas utilizadas y en parte son atribuibles a los siguientes factores:

- La frecuencia del transductor, diámetro, foco, y curvatura de la caña de haz angular.
- Temperatura.
- Acoplante.
- Habilidad del Inspector.
- Variación de la condición superficial entre el estándar de referencia y el material a inspeccionar.

5.2.3.3 CERTIFICACIÓN DEL PERSONAL PARA ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

Como mínimo, se debe utilizar como base para la certificación de personal en ensayos de ultrasonido la norma ASNT RP N°. SNT-TC-1^a. Las inspecciones por ultrasonido deben ser conducidas por inspectores certificados con nivel I, II, III. El personal de inspección debe estar entrenado y experimentado en las técnicas cubiertas tratadas en esta norma.

5.2.3.4 DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE EVALUACIÓN ACT y ADDT

- **TÉCNICA DE COMPARACIÓN DE AMPLITUDES:**

La Técnica de Comparación de Amplitudes (ACT) está basada en el principio de que la cantidad de sonido reflejada por una imperfección en un material es proporcional al área superficial de la imperfección. El pico de la amplitud de la señal de una imperfección se compara con el pico de un indicador de referencia y profundidad conocido.

- **TÉCNICA DIFERENCIAL DE DISTANCIA-AMPLITUD (ADDT)**

La técnica diferencial de distancia-amplitud (ADDT) se basa en el principio de que, la profundidad radial de una imperfección afecta la amplitud de la señal recibida y el tiempo diferencial de vuelo de la onda transmitida a medida que pasa sobre la imperfección.

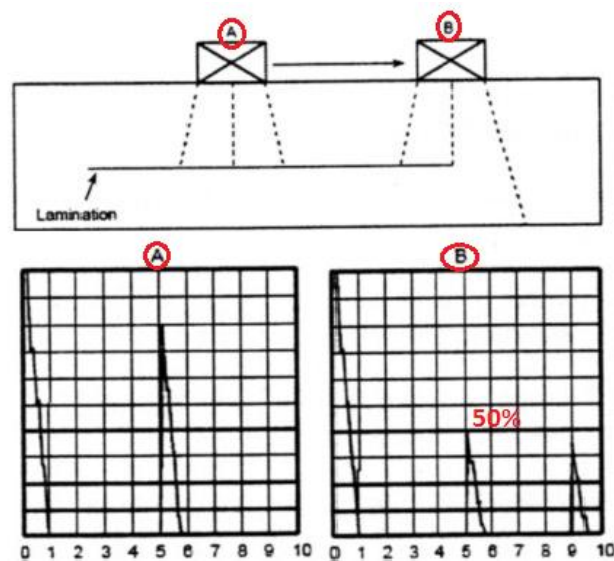
La Técnica ADDT relaciona la pérdida de amplitud, el tiempo y distancia, a medida que el haz ultrasónico se mueve sobre la imperfección. Es así como la cantidad de tiempo o distancia en la pantalla para que ocurra una caída del 50% de la amplitud máxima está relacionada a la profundidad de la imperfección.

La técnica de la caída de 6 dB es utilizada tradicionalmente como medio para determinar el tamaño de las imperfecciones laminares en las placas y para medir la longitud de imperfecciones radiales.

Cuando se determina el tamaño de una laminación (Figura 90), se registra la amplitud máxima cuando el transductor está en la posición A. Luego se desplaza el transductor hasta que la amplitud de la señal disminuye al 50%. Posición B donde el centro del transductor está posicionado directamente sobre la orilla de la imperfección. La superficie del material se marca en la posición del centro del transductor y se repite el proceso en la dirección opuesta, logrando así un mapa del tamaño y locación de la imperfección. Esta es una técnica relativamente simple pero precisa para determinar el tamaño de imperfecciones. Esta técnica solo es exacta cuando las dimensiones de la

imperfección que se está midiendo son mayores que la anchura efectiva del haz ultrasónico.

Figura 90. Técnica ADDT



*Fuente: Adaptado de [32]

Cuando se aplica la técnica diferencial de distancia-amplitud (ADDT), se debe aplicar un factor derivado conocido como "factor k" que es utilizado para calcular la profundidad del defecto.

La técnica ADDT se puede efectuar utilizando un detector ultrasónico básico para imperfecciones, pero es más sencilla, precisa y más rápida cuando se utiliza un instrumento digital que tenga la capacidad de guardar en memoria el pico activo.

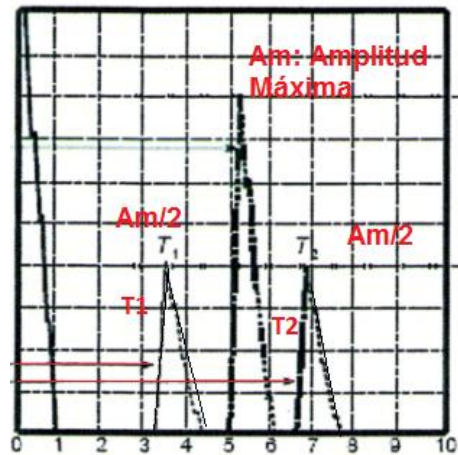
La estandarización se debe efectuar utilizando un indicador de referencia (tubo de referencia) con una ranura de profundidad. Cuando se utiliza una ranura, se debe usar la profundidad actual como la base para la estandarización, mientras que cuando se utiliza un agujero pasante la base para la estandarización sería el espesor del material. Los párrafos siguientes explican la estandarización típica y los procesos para medir imperfecciones para ambos instrumentos ultrasónicos, con y sin la capacidad de memoria de pico activo.

a) Instrumentos ultrasónicos sin la capacidad de memoria de pico activo:

Primero se debe estandarizar la línea horizontal base-tiempo del instrumento (pantalla) utilizando un bloque de referencia de haz angular, el bloque IIW u otro método adecuado (ver sección de calibración).

Como se muestra en la Figura 91, con la señal de referencia en su máxima amplitud, la ganancia se ajusta para lograr un 80% FSH¹⁴ ($A_{max} = 0.8$). Luego, se desplaza el transductor hasta que la señal cae a $\frac{1}{2} A_{max}$ y se registra la distancia a esta señal (T_1). En seguida se retrocede el transductor pasando nuevamente por la señal máxima hasta que la amplitud cae nuevamente a $\frac{1}{2} A_{max}$, y se anota la distancia a esta señal (T_2)

Figura 91. Caída de Amplitud



*Fuente: Adaptado de [32]

El factor "k" se calcula utilizando la expresión mostrada en la ecuación 24.

$$k = \frac{d_r}{A_{max} * (T_2 - T_1)} \quad (24)$$

Donde:

K= factor k para calcular profundidad de la discontinuidad

d_r =profundidad del indicador de referencia (bloque de referencia)

A_{max} =amplitud máxima de la señal

T_1 = tiempo o distancia a la señal de la $\frac{1}{2}$ de la amplitud de subida

T_2 = tiempo o distancia a la señal de la $\frac{1}{2}$ de la amplitud de bajada

¹⁴ Abreviación para "Full Screen Height", Altura Total de Pantalla.

El establecimiento del valor de ganancia de referencia y el factor "k" constituye la estandarización del instrumento para el material que se está inspeccionando y para el transductor específico que se está utilizando. El valor de ganancia utilizado para establecer la estandarización debe permanecer constante durante la medición de la profundidad de imperfecciones en los tubos de prueba.

Cuando se mide la profundidad radial de una imperfección, la A_{max} , T_1 , y T_2 se determinan maximizando la señal de la imperfección y desplazando el transductor de la misma forma en que se realizó durante la estandarización

La profundidad calculada de la imperfección en las pruebas es el producto de A_{max} , $(T_2 - T_1)$ y el factor "k":

$$d_i = A_{max} * (T_2 - T_1) * k \quad (25)$$

Donde: d_i =profundidad de la imperfección.

Un ejemplo de estandarización y medición es el siguiente:

- Determine el factor de k (estandarización), donde:

$$\begin{aligned} d_r &= 0.032 \text{ pulgadas} \\ A_{max} &= 80\% \text{ FSH} \\ T_1 &= 0.675 \text{ pulgadas} \\ T_2 &= 0.740 \text{ pulgadas} \end{aligned}$$

Solución:

$$k = \frac{d_r}{A_{max} * (T_2 - T_1)} = \frac{0.032}{0.80 * (0.740 - 0.675)} = 0.615 \quad (26)$$

Teniendo en cuenta este valor para K, se puede medir el tamaño de la imperfección para los siguientes resultados de una prueba de ultrasonido:

$$\begin{aligned} A_{max} &= 84\% \text{ FSH} \\ T_1 &= 0.588 \text{ pulgadas} \\ T_2 &= 0.655 \text{ pulgadas} \\ K &= 0.62 \end{aligned}$$

Solución:

$$\begin{aligned} d_i &= A_{max} * (T_2 - T_1) * k = 0.84 * (0.655 - 0.588) * 0.62 = 0.035 \quad (27) \\ &= 0.035 \text{ pulgadas} \end{aligned}$$

La medición de la profundidad radial en una tubería se calcula con la siguiente ecuación:

$$di = \frac{A_{max}}{2} * GW \quad (29)$$

Donde di =profundidad de la imperfección.

- Ejemplo de estandarización:

Determine el valor de anchura de compuerta donde:

$dr = 0.028$ pulgadas

$A_{max} = 80\%$ FSH.

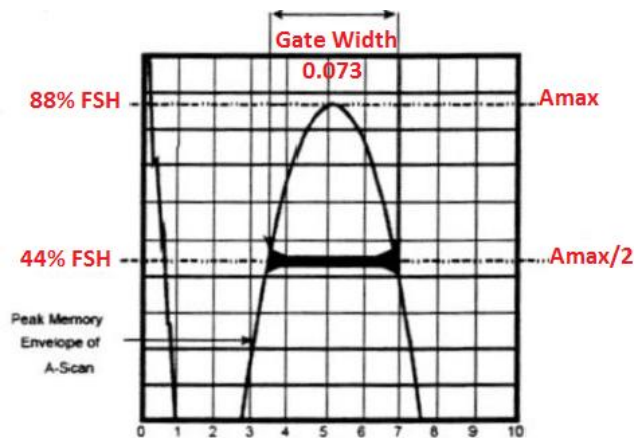
$A_{max}/2 = 40\%$ FSH

$$GW = \frac{dr}{A_{max}/2} = \frac{0.028}{0.8/2} = 0.07 \text{ pulgadas} \quad (30)$$

- EJEMPLO DE MEDICION DE IMPERFECCIÓN

Para el siguiente resultado de inspección ultrasónica (Figura 93) calcular la profundidad de la imperfección:

Figura 93. Resultado de inspección ADDT



*Fuente: Adaptado de [32]

$A_{max} = 88\%$ FSH.

$A_{max}/2=44\%$ FSH
GW=0.073

$$di = \frac{0.88}{2} * 0.073 = 0.032 \quad (31)$$

5.2.3.5 CRITERIOS GENERALES DE INSPECCIÓN:

EQUIPO NECESARIO:

- instrumento de evaluación ultrasónico
- Transductor y cuña de haz angular con el ángulo de incidencia dependiente del diámetro del tubo, espesor de pared, y tipo de imperfección a evaluar.
- Estándar de referencia.

CERTIFICACIÓN/CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO Y TRANSDUCTOR:

El instrumento y transductor utilizados para evaluar imperfecciones deben verificarse de acuerdo a la norma ASTM E317 (instrumento) y la norma ASTM E1065 (transductor) confirmando las especificaciones dadas por la agencia o fabricantes.

ESTÁNDARES DE REFERENCIA: Se debe utilizar un estándar de referencia del mismo diámetro y espesor especificado del material que se inspecciona. El material debe tener velocidad ultrasónica y propiedades atenuantes similares al tubo que se inspecciona y debe estar libre de imperfecciones. La condición superficial del estándar de referencia y el área que se está evaluando deben ser similares. Esto se debe lograr tomando el estándar de referencia y el área que se va a evaluar del mismo lote o acondicionándolos (puliendo) para lograr una condición superficial similar. El estándar de referencia puede hacerse de cualquier tubo o sección de tubo conveniente.

INDICADORES DE REFERENCIA: Todos los indicadores de referencia deben colocarse en un área del tubo donde el espesor esté dentro de ± 0.005 pulgadas del espesor nominal del tubo a inspeccionar cuando sea práctico, o dentro de ± 0.005 pulgadas del espesor típico del tubo a inspeccionar.

a. Dimensiones y tolerancias de la ranura de referencia:

- La longitud mínima debe ser dos veces la anchura (o diámetro) especificada del transductor.
- La profundidad debe ser de acuerdo a la especificación aplicable con una tolerancia de $\pm 10\%$ de la profundidad de ranura especificada o ± 0.002

pulgadas, la que sea mayor. La profundidad de la ranura debe verificarse como mínimo en cuatro puntos igualmente espaciados donde la ranura esté con profundidad completa. Todos los cuatro puntos deben estar dentro de las tolerancias anteriores. La profundidad reportada para la ranura debe ser el promedio de los cuatro valores.

- El ancho de la ranura no debe exceder 0.040 pulgadas.
- La orientación de la ranura debe estar dentro de 2° de la orientación especificada con relación al eje del tubo.
- La orientación radial debe ser tal que la variación ultrasónica no sea mayor de 1 dB entre los lados opuestos al centro de la ranura. Esto se determina por la fórmula:

$$dB = 20 \log(A_1/A_2) \quad (32)$$

Donde:

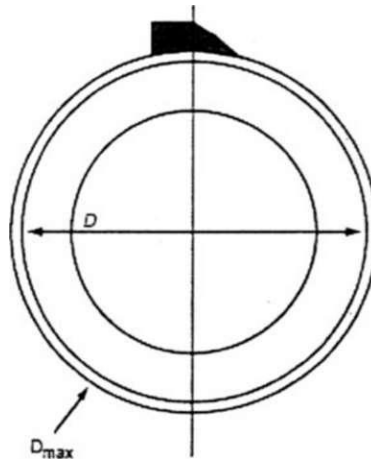
A_1 = amplitud del lado 1
 A_2 = amplitud del lado 2.

Verificación de los Indicadores de Referencia: La documentación del estándar de referencia debe contener datos que verifiquen que las condiciones de los indicadores de referencia han sido satisfechas. La información registrada para cada estándar de referencia debería incluir fabricante, diámetro, espesor actual y especificado, dimensiones de los indicadores de referencia artificial y número de serie.

- Identificación: Todos los estándares de referencia permanentes deben estar identificados. Tal identificación debe ser utilizada para rastrear la información registrada con relación al indicador de referencia.
- Criterios para el Transductor, Cuña de Haz Angular, y Acoplante: El rango de frecuencia para el transductor utilizado debe estar basado en el espesor de pared según se define a continuación:
 - a. Un transductor con frecuencia de 2.0 - 5.0 MHz para espesor de 0.250 pulgadas o mayores.
 - b. Un transductor de frecuencia de 3.5 MHz o mayor para espesores menores de 0.250 pulgadas.
- El ancho (o diámetro) del transductor debe ser de ¼ a ½ pulgada.
- Se deben utilizar cuñas de haz angular para generar ondas transversales (shear) en el material a inspeccionar de la siguiente forma:
 - a. Las cuñas de haz angular deben ser ya sea contorneadas (curvas) o planas dependiendo en la orientación de la exploración y en el

- diámetro del tubo. Las cuñas de haz angular deben estar contorneadas a máquina para tubería de diámetros menores a 9-5/8 pulgadas para imperfecciones longitudinales y en tubería de diámetro menor a 5" para imperfecciones transversales. Se pueden utilizar cuñas planas para las imperfecciones oblicuas.
- b. Cuando están curvas o contorneadas, el punto de salida del haz debe estar centrado en el radio, ver Figura 94.

Figura 94. Cuña Angular con Haz radial.



*Fuente: Adaptado de [32]

D = Diámetro del Tubo

D_{max} = Diámetro máximo permitido

Las cuñas curvas tienen que tener su radio en base al diámetro máximo especificado para el tubo. El radio de la cuña debe estar centrado basándose en el índice del haz de la cuña en relación al eje perpendicular del tubo. El radio de la cuña debe ser igual a $D_{max}/2$.

- Se debe utilizar un acoplante adecuado para eliminar el aire entre el transductor y la cuña de haz angular, y entre la cuña y la superficie del tubo. Se debe utilizar el mismo acoplante usado en la estandarización durante la evaluación de imperfecciones.

CRITERIO DEL INSTRUMENTO:

- El instrumento debe ser del tipo de pulso-eco con un desplegado en Escala A y capaz de operar en las frecuencias especificadas en la sección de criterios para el transductor de la presente norma.

- Los sistemas operados con corriente externa deberían tener la frecuencia y voltaje regulados de acuerdo con los requisitos especificados por el fabricante.

5.2.3.6 ESTANDARIZACIÓN

- Para eliminar el error de paralaje durante la estandarización e inspección, se debe observar perpendicularmente la pantalla de la Escala-A.
- Se debe obtener la amplitud máxima de ambos lados y en el centro del indicador de referencia en el estándar, utilizando la amplitud mayor como referencia.

REVISIÓN DE ESTANDARIZACIÓN: Toda la tubería inspeccionada entre una revisión inaceptable y la revisión más reciente aceptable debe ser re-inspeccionada o rechazada. La revisión de estandarización se debe efectuar como sigue:

- a) Al principio de cada turno de inspección.
- b) Mínimo una vez cada 25 áreas medidas o inspeccionadas en una operación continua.
- c) Después de cualquier interrupción de corriente o cambio de fuente de poder (batería a cargador).
- d) Cuando haya cambio de operador o inspector.
- e) Antes de apagar el equipo durante el trabajo.
- f) Antes de resumir la operación después de reparar algún equipo.
- g) Cuando se cambie el transductor, cable, cuña o acoplante.

5.2.3.7 PROCEDIMIENTOS DE INSPECCIÓN

- a) Estandarice la unidad para ondas transversales según se explicó en la sección de la técnica ADT "instrumentos ultrasónicos sin la capacidad de memoria de pico activo".
- b) Limpie la superficie del tubo y aplique una cantidad uniforme de acoplante en el área del tubo que se inspecciona.
- c) Cuando explore para localizar imperfecciones, añada un mínimo de 4 dB a la ganancia de referencia.
- d) La dirección de la exploración debe ser perpendicular a la orientación sospechada de la imperfección. La velocidad de exploración no debería exceder 5 pulgadas por segundo. Debería existir una repetición entre las exploraciones.

- **EVALUACIÓN UTILIZANDO ULTRASONIDO CON ONDAS DE COMPRESIÓN:**

- a) Se determina que la imperfección rompe la superficie, Si el espesor de pared es menor que el mínimo definido en la especificación aplicable y la imperfección debe clasificarse como defecto.
- b) Para imperfecciones lineares que rompen la superficie; la profundidad radial de la imperfección puede usarse para clasificar la imperfección mediante la sustracción del espesor remanente del promedio de pared que rodea la imperfección. Si la profundidad radial excede la tolerancia de profundidad definida en la especificación que aplique, la imperfección se debe clasificar como defecto.

Determinación de la longitud de la Imperfección:

Se debería utilizar la técnica de la caída de 6dB (caída de 50%) para localizar los extremos de la imperfección, cuando se especifique. La longitud de la imperfección se determina midiendo la distancia entre los extremos según la técnica diferencial Distancia-Amplitud ADDT.

• EVALUACIÓN UTILIZANDO LA TÉCNICA DE COMPARACIÓN DE AMPLITUDES (ACT)

- a) Para imperfecciones internas que se ha determinado que rompen la superficie, se puede utilizar la técnica ACT.
- b) Cuando se localiza una imperfección, el área se debe explorar rotando el transductor alrededor del área sospechada hasta que se logre máxima amplitud para evaluar.
- c) Cambie la dirección del haz y observe el cambio en el eco desplegado. (El eco de una imperfección lisa es más angosto que el eco de una rugosa. Hay una mayor pérdida de amplitud cuando el sonido se mueve alrededor de una imperfección linear que para una imperfección redonda).
- d) Mueva el transductor hacia atrás y hacia delante, causando que el haz se mueva hacia arriba y hacia abajo con la profundidad de la imperfección. Observe el movimiento horizontal de los ecos (izquierda - derecha y viceversa) a lo largo del desplegado de la Escala-A. (Un movimiento mayor del eco indica mayor profundidad hacia la pared, asumiendo que la profundidad está en la dirección radial. El movimiento horizontal que excede el del indicador de referencia, aún con amplitudes bajas, indica una imperfección que podría evaluarse utilizando la técnica ADDT u otro método apropiado).
- e) Regrese a la posición de máxima amplitud.
- f) Ajuste la ganancia de manera que la amplitud máxima de la señal esté a 80% de altura de pantalla y anote el cambio de dB en relación al valor

de referencia. Un valor de ganancia menor que el de referencia indica una amplitud mayor que la amplitud de referencia.

- **EVALUACIÓN UTILIZANDO LA TÉCNICA ADDT**

- a) El eje del haz está alineado con la orilla de la imperfección cuando la amplitud de la reflexión está a la mitad de su pico máximo. En este punto, la mitad de la energía ultrasónica se está reflejando hacia el transductor, mientras que la otra mitad continúa a través del material.
- b) Es necesario Identificar las orillas de la imperfección mediante la manipulación del transductor hacia atrás y hacia delante a través de la imperfección.

La profundidad de la imperfección se calcula con la ecuación 33:

$$d_i = A_{max} * (T_2 - T_1) * k \quad (33)$$

Donde

d_i =profundidad de la imperfección.

K= factor k para calcular profundidad de la discontinuidad

A_{max} =amplitud máxima de la señal

T_1 = tiempo o distancia a la señal de la 1/2 de la amplitud de subida

T_2 = tiempo o distancia a la señal de la 1/2 de la amplitud de bajada

6.2.3.8 REGISTROS

Se deben mantener registros que incluyan lo siguiente:

1. Identificación del tubo.
2. Técnica de evaluación según se identifica en esta práctica recomendada.
3. Dimensiones y rastreabilidad del estándar de referencia para la evaluación.

6. CONCLUSIONES

- La utilización del ultrasonido como método de ensayo no destructivo permite obtener una alta confiabilidad de medición de la calidad del producto sobre los otros métodos, ya que ofrece una inspección del material de forma tanto superficial como de profundidad, característica que no se puede evaluar por casi ningún otro método (a excepción de la radiografía industrial). Sin embargo el ultrasonido supera a la radiografía en aspectos como, el peligro potencial que esta representa para el personal y los costos de los equipos y de adecuación locativa. Así, el ultrasonido no aporta ningún riesgo para la salud, utiliza equipos portables y ofrece resultados inmediatos.
- Antes de tomar alguna decisión respecto a los resultados de la inspección por ultrasonido de un material, es recomendable utilizar un método de apoyo (otro tipo de ensayo no destructivo), para asegurar una evaluación certera del objeto de estudio, por ejemplo utilizar inspección visual.
- La resolución y sensibilidad en una prueba de ultrasonido, son directamente proporcionales a la frecuencia del transductor; sin embargo, a medida que esta frecuencia aumenta, el poder de penetración en el material disminuye y el transductor será más delgado y frágil; por esta razón, se suele utilizar la técnica de inmersión para pruebas que requieran frecuencias mayores de 10 MHz.
- Cuando la detección de discontinuidades cercanas a la superficie sea importante para la inspección, y la zona muerta del haz ultrasónico impida evaluar la sección deseada, la solución podría ser simplemente inspeccionar desde el lado opuesto del material, si esto no es posible porque no hay acceso por ambas caras de la pieza, se podría utilizar un transductor de doble elemento para aumentar la resolución cerca de la superficie.
- Una limitación del método de ensayo no destructivo por ultrasonido es que debe tener un inspector especializado que conozca los métodos de ultrasonido apropiados, de acuerdo a la geometría de la pieza a evaluar y que así mismo, pueda interpretar los resultados de la prueba en forma adecuada (interpretación de ecos).
- No todas las señales detectadas durante el ensayo ultrasónico corresponden a discontinuidades reales, antes de emitir algún juicio se debe examinar cuidadosamente la señal obtenida en la pantalla del

instrumento, para establecer si la indicación es falsa (como una reflexión debida a los bordes de la pieza), que en muchos casos pueden ser evitadas por medio de una adecuada elección del palpador, y dirección del mismo.

- Es importante que en las empresas en las que realicen pruebas de materiales con ensayos no destructivos, posean un manual de procedimientos detallado que incluya, las indicaciones para la utilización de ensayos no destructivos dentro de su sistema de gestión de calidad; con el fin de que los empleados puedan conocer de forma clara y cumpliendo con las normas internacionales, los pasos a seguir para la realización de estas pruebas, de esta forma se contará con un registro histórico de cada elemento evaluado para la toma de decisiones pertinentes respecto al mismo.
- El equipo humano que realiza las pruebas de ensayo no destructivo debe contar con la idoneidad para este tipo de procedimientos, para esto debe estar avalado con la Certificación personal ASNT ASNT SNT-TC-1A (Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing) iniciando con el nivel 1, y avanzando posteriormente según sea su experiencia al nivel 2 y 3.
- Es indispensable hacer un uso adecuado del palpador a fin de evitar pérdidas en sensibilidad y resolución cuando se realiza una inspección por ultrasonido; pues aunque están diseñados para soportar cierto grado de abuso; una incorrecta manipulación o golpes podrían ocasionar que el elemento piezoeléctrico averíe el material de relleno, afectando su beneficio de amortiguamiento; lo cual hace perder la capacidad de controlar la vibración del cristal (control de frecuencia); de manera que si se genera una amortiguación mayor habrá pérdida en la sensibilidad y si es menor la amortiguación habrá pérdida en la resolución.
- Para garantizar la integridad del equipo, y contar con una correcta validación de los resultados obtenidos durante un ensayo no destructivo por ultrasonido, es fundamental contar con un equipo que haya sido calibrado previamente cumpliendo las especificaciones de requisitos y tolerancias dadas en las normas correspondientes (ejemplo las normas ASTM E317 y ASTM E1065) y de acuerdo a las necesidades de la aplicación que se va a realizar.
- Los palpadores deben revisarse periódicamente a través de bloques de referencia certificados (ejemplo Bloques I.I.W), de manera que se verifiquen el perfil, punto de salida y la alineación del haz ultrasónico, pues estos pueden verse afectados (desalineados) a causa del desgaste de la zapata o a defectos de fabricación.

- Para realizar una correcta evaluación de las discontinuidades presentes en un material durante una inspección ultrasónica, la elección de los elementos a utilizar y sus características, como la frecuencia del transductor, la temperatura, el acoplante y la habilidad del Inspector, son factores que influyen grandemente en los resultados obtenidos.
- Es necesario que los patrones de referencia a utilizar en las pruebas, sean fabricados a partir de mismo material a ser inspeccionado, cumpliendo con las mismas dimensiones y propiedades acústicas del objeto a evaluar y sin imperfecciones. De igual forma es fundamental que los bloques patrón sean almacenados en un área protegida de posibles daños o pérdidas y que cuenten con un registro tanto de sus dimensiones físicas como de sus discontinuidades (o reflectores) artificiales para la selección del mismo según la prueba a aplicar. Luego de su utilización se le debe quitar al patrón todo resto de acoplante y se debe guardar en el área de almacenamiento evitando daños mecánicos del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Capacitación industrial en métodos No-Destructivos. *Ensayos Con Ultrasonido Nivel I y Nivel II*. s.l. : NOV-TUBOSCOPE, 2011.
2. Diccionario, Real academia de la lengua española. [En línea] citado en Agosto de 2011. <http://www.rae.es/rae.html>.
3. **ESPINOSA FUENTES, FERNANDO**. Confiabilidad Operacional de Equipos: Metodologías y Herramientas. *Pag. 3*. [En línea] citado en Junio de 2011. Disponible en: <http://ing.utralca.cl/~fepinoso/ANALISIS%20CAUSA%20RAIZ%20y%20sus%20herramientas.pdf>.
4. NDT Technical Solutions. [En línea] Citado en Junio de 2011. http://ndttechscr.com/index.php?option=com_content&view=article&id=51&Itemid=63.
5. **ACOSTA FREIRE, WILIAN ORLANDO y SALAZAR BALLADARES, EDWIN ROLANDO**. *Optimización de Procedimientos de Inspección Para Tubería de Perforación (Drill Pipe), Tubería de Producción (Tubing) Y Tubería de Revestimiento (Casing) de Pozos Petroleros Utilizando Ensayos No Destructivos*. Quito : ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL-FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA, 2007.
6. Observatorio Tecnológico de la soldadura. [En línea] citado en Julio de 2011. http://www.obtesol.es/index.php?option=com_content&task=view&id=2782&Itemid=31.
7. *Norma Técnica Colombiana NTC 2120 Guía Para La Inspección De Soldadura Mediante Ensayos No Destructivos*. Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. pág. 35.
8. Inspección por ultrasonido. [En línea] citado en Junio de 2011. <http://www.plusformacion.com/Recursos/r/Inspeccion-por-Ultrasonido>.
9. CURSO DE ULTRASONIDO BASICO. *Facultad de ingeniería Universidad central de Venezuela*. [En línea] citado en Junio de 2011. <http://www.sistendca.com/DOCUMENTOS/Curso%20Ultrasonido%20Basico.pdf>.
10. Diccionario: Definición de Ultrasonido . [En línea] citado en Junio de 2011. <http://www.alegsa.com.ar/Dic/ultrasonido.php>.
11. Ultrasonic Testing. [En línea] citado en Julio de 2011. http://www.qsionline.com/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/intro_to_ultrasonics.ppt.
12. **LEGORI, Roberto**. Curso Multimedia de Autoaprendizaje. *Ensayos no Destructivos, Ensayos de Ultrasonidos*. s.l. : Simula, 2010. Vol. Versión 4.0.
13. phased array characteristics. [En línea] citado en Julio de 2011. <http://www.olympus-ims.com/es/ndt-tutorials/transducers/characteristics/>.
14. Nondestructive Material Testing with Ultrasonics . [En línea] citado en Julio de 2011. <http://www.ndt.net/article/v05n09/berke/berke2.htm>.
15. **AVILES, Gonzalo**. *Cursillo de ultrasonido*. 2003.

16. **VALENCIA, Ilarregui Jorge.** Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. *Caracterización mediante técnicas de ultrasonido de un laminado de fibra de vidrio.* Madrid : Universidad Carlos III Madrid, 2009.
17. **MOROS, Adriana Catalina y TORRES, Elkin Yesid.** Aplicación de la técnica de ultrasonido para la estimación de la pérdida de espesor en la superficie externa de una pieza tabular. Bucaramanga : Proyecto de Grado. Ingeniero Metalúrgico. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de Materiales. Grupo de Investigación GIMAT, 2009.
18. Energías Renovables. [En línea] 2010. <http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2009/05/06/el-efecto-piezoelectrico/>.
19. **Luis Miguel Vega Fidalgo, David Zorita Téllez.** Proyecto de Ingeniería de las Ondas I. *Universidad de Valladolid.* [En línea] citado en Julio de 2011. http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_03_04/infra_y_ultra/generadores_ultrasonidos.htm.
20. **ESCALONA, Iván.** Pruebas no destructivas - Ultrasonido. [En línea] citado Junio de 2011. <http://www.revistaciencias.com>.
21. **ECHEVERRIA, Ricardo.** Ultrasonido. s.l. : Universidad Nacional de Comahue. Laboratorio de Ensayos no Destructivos. Facultad de Ingeniería., 2002.
22. Olympus. [En línea] citado Julio de 2011. <http://www.olympus-ims.com/es/ultrasonic-transducers/contact-transducers/>.
23. ntd.org. *ntd.org.* [En línea] Citado en Julio de 2011. <http://www.ndt.org/class.asp?ObjectID=18277>.
24. **Quivoy Peralta, Fausto Leandro.** *Gestión de Calidad Aplicada al Proceso de Soldadura para el Proyecto Gas de Camisea.* Lima : proyecto de tesis para optar el título de ingeniero mecánico universidad nacional de ingeniería , 2004.
25. **MICHNOWSKI, Wladyslaw ; MIS, Rafal ; MIERZWA, aroslaw ; LATAROWSKI, Grzegorz;** Ultrasonic Examination of Difficult Welds. <http://www.ultrasonic.home.pl/pdf/publikacje/17wcndt.pdf>. [En línea] citado en Julio de 2011.
26. **Marañón Abreu, Rafael.** Improving the reliability of data fusion systems for Non Destructive Testing (NDT). [En línea] citado en Julio de 2011. http://www.rafamara.com/blog/wp-content/uploads/2007/07/Rafael_Maranon-defense-07-07-2.ppt.
27. Lab Facility (Nano Bio Medicine Lab in Pukyong National Univ.). *Ultrasonic C-SCAN Immersion Systems.* [En línea] citado en Julio de 2011. <http://jhoh.web.officelive.com/facility.aspx>.
28. Mitos y Realidades de la Técnica TOFD. [En línea] citado en Julio de 2011. http://www.llogsa.com/nueva_web/Centro_de_descarga/ultratips_html/ultratips-edicion-65.php.
29. olympus TOFD ultrasonic-transducers. [En línea] Citado en Julio de 2011. <http://www.olympus-ims.com/es/ultrasonic-transducers/tofd/>.
30. Técnica de inspección pulso-eco y TOFD. [En línea] citado en Agosto de 2011. <http://www.olympus-ims.com/es/pv-100/>.

31. **Hellier, Charles J.** *HANDBOOK OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION*. s.l. : McGRAW-HILL pag 402 FIGURE 7-95, 2003.
32. **SUE, API RP.** *Recommended Practice for Ultrasonic Evaluation of Pipe Imperfections*. 2009.
33. Normalización en Colombia. [En línea] citado en Agosto de 2011. <http://sites.google.com/site/metrologiaup/unidad-i/importancia-de-las-mediciones/la-metrologia-en-colombia/normalizacion-y-estandarizacion>.
34. **ICONTEC.** NORMALIZACIÓN. [En línea] citado en Julio de 2011. <http://www.icontec.org.co/index.php?section=172&module=navigationmodule>.
35. DECRETO 3523 DE 2009 . [En línea] citado en Agosto de 2011. http://www.sic.gov.co/archivo_descarga.php?idcategoria=3721 .
36. Traducción de ASTM E213. [En línea] Citado en Agosto de 2011. http://myastm.astm.org/filtrexx40.cgi?P+MEM_NUM++P+cart++/usr6/htdocs/newpilot.com/SUBSCRIPTION/HISTORICAL/E213-98.htm.
37. Defición Tubería. [En línea] Citado en Junio de 2011. http://www.plomeria.us/plomeros/trabajo/hogar/que_es_una_tuberia/.
38. **Villacrés, Andrés.** *PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN DE TUBERÍAS DE PERFORACIÓN (DRILL-PIPE) CAUSADOS POR DIFERENTES PROBLEMAS DENTRO DE UN POZO EN LAS INSTALACIONES DE INSEPECA CIA LTDA*. Quito : UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL, tesis de grado, 2007.
39. **CÁRDENAS RUIZ, MARIO.** *ANÁLISIS COMPARATIVO DE EVALUACIÓN DE DEFECTOS EN DUCTOS ENTRE ESTUDIOS REALIZADOS CON EQUIPOS INSTRUMENTADOS INTELIGENTES DE SEGUNDA Y TERCERA GENERACIÓN*. Mexico : INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, Facultad de ingeniería mecánica. Tesis de maestría, 2007.
40. **SUE, Norma API RP.** *Recommended Practice for Ultrasonic Evaluation of Pipe Imperfections*. 2009.
41. **ESCALONA, Iván.** Pruebas no destructivas - Ultrasonido. [En línea] <http://www.revistaciencias.com>.
42. Olympus. [En línea] 2011. <http://www.olympus-ims.com/es/ultrasonic-transducers/contact-transducers/>.

ANEXOS

A. FUNDAMENTOS DE TUBERIAS

¿QUÉ ES UNA TUBERÍA?

El termino tubo se refiere a un cuerpo cilíndrico hueco con los extremos abiertos, adecuados para transportar fluidos. La tubería corresponde a la unión o conductos conformados de tubos para la misma función.

Los productos tubulares se obtienen por procesos diferentes y cada uno de ellos posee cualidades específicas que los caracteriza, tales como acabado, dimensiones, material y discontinuidades, que son típicas del propio proceso. Según la técnica de fabricación, los tubos se pueden agrupar en:

- Tubos sin soldadura (Sin costura): se obtienen mediante deformación plástica de lingotes cilíndricos generalmente de acero los cuales son calentados y trabajados con máquinas y herramientas específicas que permiten hacer un agujero mediante un penetrador. La tubería, sin costura es la mejor para la contención de la presión gracias a su homogeneidad en todas sus direcciones. Además, es la forma más común de fabricación y por tanto la más comercial. [37]
- Tubos con soldadura, se obtienen soldando los dos bordes de una placa laminada después de haberla deformado de manera adecuada, esta parte soldada, será la parte más débil de la tubería ya que es sensible a altas presiones. [37]

Para la industria del petrolero la tubería constituye la estructura mecánica del pozo, el conducto por el cual la zona productora se comunica a superficie o por la cual las presiones del crudo son dirigidas y controladas para extraer el petróleo eficientemente.

Entre las tuberías más representativas de la industria de extracción de petróleo se encuentran:

- Tubería de perforación.
- Tubería de revestimiento.
- Tubería de producción.

TUBERÍA DE PERFORACIÓN

La tubería de perforación o drill pipe es una barra de acero hueca utilizada para llevar a cabo los trabajos durante la operación de la perforación, la cual es tan larga como la profundidad total programada. Generalmente se le conoce como tubería de trabajo, porque está expuesta a múltiples esfuerzos durante las operaciones de perforación del pozo

TUBERIA DE REVESTIMIENTO

Las tuberías de revestimiento o casing son tuberías que constituyen el medio con el cual se reviste el agujero que se va perforando. Con ello se asegura el éxito de las operaciones llevadas a cabo durante las etapas de perforación y terminación del pozo. El objetivo de las tuberías de revestimiento es proteger las zonas perforar y aislar las zonas problemáticas que se presentan durante la perforación. Tal es el caso de revestir el agujero para mantener la estabilidad del mismo, prevenir contaminaciones, aislar los fluidos de las formaciones productoras, controlar las presiones durante la perforación y la vida productiva del pozo. [38]

TUBERIA DE PRODUCCIÓN

La tubería de producción o tubing es el elemento tubular a través del cual se conducen hasta la superficie los fluidos producidos de un pozo, o bien, los fluidos inyectados de la superficie hasta el yacimiento.

DEFECTOS EN TUBERÍA

Cuando una estructura tubular se encuentra en servicio, está sometida a la acción de diferentes fuerzas provenientes de la operación y del ambiente al que está expuesta, este ambiente deteriora su estado físico y aumenta la probabilidad de fallas inesperadas. Los daños que una tubería que puede presentar son [39]:

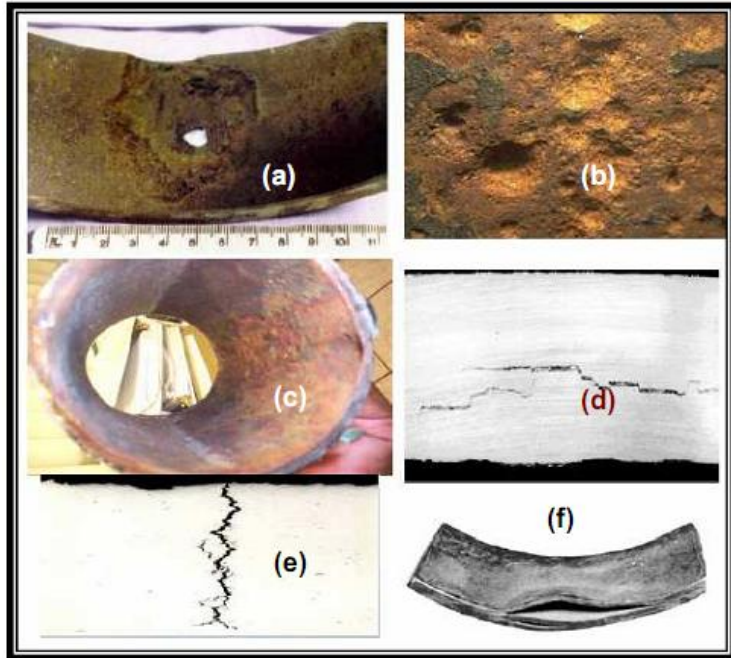
- Aparición de grietas.
- Reducción de la sección transversal o del espesor de pared.
- Disminución de la resistencia del material.

En la Figura 95 se observan los daños más frecuentes que una tubería en operación puede presentar

- a) Corrosión localizada.
- b) Corrosión uniforme.
- c) Erosión y desgaste.

- d) y e) Agrietamiento.
- e) Laminación.

Figura 95. Principales fallas en tubería



*Fuente: Tomado de [39]a