

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**PROPUESTA DE NORMATIVAS DE ENSAYO NO
DESTRUCTIVO POR ULTRASONIDO PARA PRÁCTICAS Y
SERVICIOS DE LABORATORIO**

PRESENTADO POR:

RIGOBERTO FRANCISCO JIMÉNEZ AGUILAR

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL :

M.Sc. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Dr. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :

Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR INTERINO :

Ing. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**PROPUESTA DE NORMATIVAS DE ENSAYO NO
DESTRUCTIVO POR ULTRASONIDO PARA PRÁCTICAS Y
SERVICIOS DE LABORATORIO**

Presentado por :

RIGOBERTO FRANCISCO JIMÉNEZ AGUILAR

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, junio de 2022

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

DEDICATORIA

Este trabajo de grado está dedicado a:

Mi madre Noemí del Carmen Aguilar Vda. de Jiménez quien con su amor, paciencia y ayuda incondicional me ha enseñado que, con esfuerzo, perseverancia y de la mano de Dios se obtienen los logros más grandes en la vida.

A mi padre Rigoberto Jiménez en paz descanse, quien en momentos muy difíciles siempre me apoyó económicamente, me enseñó que con valentía e inteligencia se puede llegar muy lejos.

A mi hermana María Victoria que siempre creyó en mí y me apoyó moralmente, a toda mi familia que de alguna forma ayudó para que llegara hasta este nivel de mi carrera.

Y finalmente este trabajo de grado va dedicado a todas esas personas amigos, amigas, compañeros y compañeras de estudio, por extender su mano en momentos difíciles, a todos y todas los llevo muy presente.

Rigoberto Francisco

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a mi familia, padre, madre, hermana, tíos, tías quienes en momentos difíciles me brindaron su incondicional apoyo moral y económicamente.

Un enorme agradecimiento a todos los docentes de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura y catedráticos de la Escuela de Ingeniería Mecánica por formar en mí un profesional con ética, valores y responsabilidades, a todos muchas gracias por compartir sus conocimientos.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, docente asesor durante este proceso, quien con su conocimiento, enseñanza y colaboración permitió la culminación de este trabajo de graduación.

Rigoberto Francisco

PROPUESTA DE NORMATIVAS DE ENSAYO NO DESTRUCTIVO POR ULTRASONIDO PARA PRÁCTICAS Y SERVICIOS DE LABORATORIO

Estudiante: Br. Rigoberto Francisco Jiménez Aguilar¹
Docente Asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz²

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador

RESUMEN

Se ha realizado una investigación bibliográfica exhaustiva sobre ensayos no destructivos aplicando las técnicas de ultrasonidos para luego dar una propuesta de normativas que se puedan aplicar durante los ensayos que se realicen en prácticas los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica, utilizando un equipo capaz de llevar a cabo los procedimientos de tales ensayos. Como primera propuesta se estudió una normativa con la cual se pueden realizar medición de espesores en todo tipo de metales con la alternativa de evaluarlos a temperaturas elevadas, al mismo tiempo pudiendo determinar imperfecciones internas. Como segunda propuesta se eligió una normativa con la cual se realizan inspecciones en soldaduras a tope utilizando elementos básicos de inspección. Como última propuesta se eligió una norma con la cual se puedan determinar defectos internos en todo tipo de uniones metálicas, en materiales que hayan pasado por cualquier tipo de proceso mecánico, teniendo como impedimento la variabilidad de la geometría. Y finalmente, se hace la propuesta de un procedimiento a seguir utilizando el equipo de ultrasonido adquirido por la Escuela de Ingeniería Mecánica tomando de referencia las normas estudiadas en este trabajo de graduación.

Palabras claves: Ensayo por ultrasonido, Método pulso-eco, y Ensayo no destructivo.

1 rigobertoues1991@gmail.com

2 jonathan.berrios@ues.edu.sv

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Fundamentos y conceptos básicos sobre el ultrasonido.....	3
1.1.1. Generación y detección de ultrasonidos.....	6
1.2. Equipos y accesorios utilizados en ensayos por ultrasonido.....	8
1.2.1. Tipos de equipos ultrasónicos.....	8
1.2.2. Equipos como detectores de fallas.....	9
1.2.3. Equipos como medidores de espesor.....	11
1.2.4. Palpadores (transductores ultrasónicos).....	13
1.2.5. Factores a considerar en la elección del transductor.....	17
1.2.6. Accesorios para calibrar el equipo ultrasónico.....	18
1.3. Aplicaciones, ventajas y desventajas de los ensayos no destructivos por ultrasonido.....	21
1.4. Ensayos y técnicas por ultrasonido.....	23
1.4.1. Ensayo ultrasónico por pulso-eco.....	23
1.4.2. Ensayo ultrasónico por contacto (técnica de ultrasonido).....	28
1.4.3. Ensayo ultrasónico por transmisión.....	29
1.4.4. Ensayo ultrasónico por inmersión.....	31
1.5. Normas para la aplicación de ensayos por ultrasonido.....	32
2. DISEÑO DE NORMATIVAS PROPUESTAS A ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ULTRASONIDO.....	34
2.1. Generalidades.....	34
2.1.1. Procedimiento de inspección.....	35
2.1.2. Criterios de aceptación.....	37
2.2. Propuesta de la práctica estándar para medir espesores por contacto manual utilizando el método pulso-eco (norma E797-15 de la ASTM).....	38
2.2.1. Riesgos técnicos que se pueden presentar.....	47
2.3. Propuesta del código D1.1 de la AWS, aplicado a la inspección de soldaduras.....	50
2.3.1. La calificación del personal.....	51
2.3.2. Proceso.....	52
2.3.3. Calibración de la unidad ultrasónica con bloques tipo IIW.....	57
2.4. Propuesta de normativa para la aplicación de la técnica matriz en fase (phased array).....	70
2.5. Norma E273 de la ASTM, práctica para realizar examen de ultrasonido en tubería soldada.....	84

	Pág.
2.5.1. Procedimiento de examen.....	86
2.5.2 Interpretación de resultados.....	87
2.6. Norma 10863 de la ISO. Uso de la técnica tiempo de difracción de vuelo (TOFD).....	87
2.7. Propuesta de norma A609 de la ASTM.....	90
2.8. Aspectos básicos para la certificación de personal.....	91
2.8.1. Cuestiones específicas.....	94
3. PROPUESTA DE ENSAYOS.....	95
3.1. Generalidades.....	95
3.2. Equipos y accesorios necesarios.....	97
3.3. Preparación de las muestras.....	98
3.4. Metodología.....	98
3.4.1. Determinación de espesores superficies planas.....	98
3.4.2. Determinación de discontinuidades en soldaduras a tope.....	99
3.5. Registro de la información.....	100
3.5.1. Pantalla RF A-scan.....	101
3.5.2. Pantalla medición de espesor Rect A-scan.....	101
3.5.3. Pantalla medición de espesor B-scan.....	102
3.5.4. Pantallas de detección de fallas.....	103
3.5.5. Pantalla modo AWS.....	104
CONCLUSIONES.....	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
ANEXOS.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Frecuencias del sonido.....	4
Fig. 1.2. Palpador-Transductor.....	4
Fig. 1.3. Ensayo ultrasónico por pulso eco.....	5
Fig. 1.4. Equipo detector de fallas analógico.....	9
Fig. 1.5. Detector de fallas con pantalla LCD.....	10
Fig. 1.6. Inspección con Arreglo de Fases (fase array).....	11
Fig. 1.7. Medidor de espesores básico.....	12
Fig. 1.8. Medidor de espesores de alta precisión.....	12
Fig. 1.9. Representación de cómo se propagan las ondas ultrasónicas en la pieza analizada.....	13
Fig. 1.10. Funcionamiento de un palpador de elemento dual.....	14
Fig. 1.11. Esquema que presenta en detalle el palpador de elemento dual.....	14
Fig. 1.12. Ondas ultrasónicas con un palpador angular de 45°.....	14
Fig. 1.13. Forma de uso de un palpador de línea retrasada.....	15
Fig. 1.14. Diferentes tipos de palpadores de línea de retardo.....	15
Fig. 1.15. Palpadores de cara protegida o suela protegida.....	16
Fig. 1.16. Modelos de palpadores de inmersión: (a) Foco esférico; (b) foco cilíndrico; (c) No enfocado; y (d) Enfocado.....	16
Fig. 1.17. Palpadores de alta frecuencia.....	17
Fig. 1.18. Estándares de referencia.....	18
Fig. 1.19. Patrones o bloques: (a) De discontinuidades; y (b) de referencia para calibración del equipo.....	19
Fig. 1.20. Patrón de medición de espesores tipo cilindros.....	19
Fig. 1.21. Elemento sin defectos.....	24
Fig. 1.22. Representación Pulso-Eco en material con defecto.....	25
Fig. 1.23. Variabilidad del eco de fondo: (a) Discontinuidad pequeña; y (b) discontinuidad grande.....	26
Fig. 1.24. Ecos posibles de reflexión.....	27
Fig. 1.25. Posición y dimensión de una discontinuidad: (a) Discontinuidad detectada por el haz ultrasónico; (b) Distancia y altura de la discontinuidad.....	28
Fig. 1.26. Demostración de un ensayo ultrasónico por contacto.....	29
Fig. 1.27. Demostración esquemática de un ensayo ultrasónico por transmisión	29
Fig. 1.28. Método de transmisión: (a) Transductor emisor y receptor en una pieza sin defecto y con defecto interno; y (b) eco inicial y eco final sin defecto y eco final con defecto en la pieza analizada.....	30
Fig. 1.29. Método de transmisión con reflexión.....	31
Fig. 1.30. Técnica de Inmersión.....	31
Fig. 1.31. Sistema de inmersión en el que la pieza permanece inmóvil.....	32
Fig. 2.1. Relación tiempo de tránsito/espesor.....	40

	Pág.
Fig. 2.2. Referencia para determinar el espesor del material inspeccionado.....	41
Fig. 2.3. Demostración de detector de pantalla A-scan y lectura de espesor.....	42
Fig. 2.4. No linealidad del transductor dual: (a) La trayectoria del sonido proporcional aumenta según disminuya el espesor; y (b) valores típicos de error de lectura.....	43
Fig. 2.5. Bloque de calibración, espesor típico de cuatro pasos.....	49
Fig. 2.6. Bloque de calibración tipo escalera de cinco pasos.....	50
Fig. 2.7. Vista en planta de los patrones de escaneo de ultrasonido.....	53
Fig. 2.8. Bloque típico tipo IIW.....	58
Fig. 2.9. Posiciones A, B, C, D, E, F y G típicas del transductor.....	58
Fig. 2.10. Bloque de referencia para la resolución - RC (dimensiones en mm).....	60
Fig. 2.11. Demostración de las posiciones del transductor para la calibración por resolución.....	60
Fig. 2.12. Procedimiento para determinar la distancia de aproximación de la unidad de búsqueda utilizando el bloque de referencia IIW.....	61
Fig. 2.13. Propagación del haz con palpador angular.....	62
Fig. 2.14. Representación de DAI & DA II: (a) Distancia de medio salto; y (b) Distancia de salto.....	63
Fig. 2.15. Detección de posición de una discontinuidad: (a) Esquema de la discontinuidad; y (b) Determinación de la distancia angular de la discontinuidad.....	64
Fig. 2.16. Detección de discontinuidad en segunda pierna.....	64
Fig. 2.17. Distancias de salto y medio salto.....	65
Fig. 2.18. Zona de barrido, límite cercano y lejano.....	66
Fig. 2.19. Ilustración de patrones de barrido para detectar discontinuidades.....	67
Fig. 2.20. Marcado de la placa soldada a tope.....	68
Fig. 2.21. Técnica de caída de 6 decibeles.....	70
Fig. 2.22. Bloque de referencia recomendado para el nivel de prueba A.....	77
Fig. 2.23. Bloque de referencia recomendado para el nivel de prueba B.....	78
Fig. 2.24. Bloque de referencia recomendado para el nivel de prueba C.....	78
Fig. 2.25. Proyección de ángulo de onda ultrasónica. (Técnica de contacto).....	85
Fig. 3.1. Equipo elcometer fd800dl.....	100
Fig. 3.2. Pantalla A-SCAN: (a) Pantalla completa, sólo onda; y (b) ½ Pantalla de onda, ½ pantalla de dígitos.....	101
Fig. 3.3. Pantalla A-SCAN RECT: (a) Pantalla completa, sólo onda; y (b) ½ pantalla de onda, ½ pantalla de dígitos.....	102
Fig. 3.4. Pantalla B-SCAN. Imagen transversal de la pared y espesor del material.....	102
Fig. 3.5. Tipos de pantalla del detector de defectos: (a) RF; (b) + RECT; y (c) RECTFW.....	103
Fig. 3.6. Demostración de: (a) Uso AWS; (b) Curva TCG; y (c) Curva DAC.....	105

	Pág.
Fig. A.1. Equipo para ultrasonido convencional.....	110
Fig. A.2. Detector de defectos por Ultrasonido convencional.....	111
Fig. A.3. Sonatest VEO, Detector de defectos Matriz en Fase.....	111
Fig. A.4. Detector de fallas portátil.....	112
Fig. A.5. Experto detector de fallas ultrasónico.....	112
Fig. A.6. Detector de fallas (Flexscan) para matriz en fase.....	113
Fig. A.7. Detector de fallas, para las técnicas: Matriz en fase, TOFD y FMC / TFM.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Requisitos de calificación y calibración de equipos.....	52
Tabla 2.2. Tipos de movimientos del transductor.....	54
Tabla 2.3. Criterios de aceptación-rechazo con ultrasonido (conexiones no tubulares cargadas estáticamente y conexiones no tubulares cargadas cíclicamente en compresión).....	55
Tabla 2.4. Niveles de escaneo (conexiones no tubulares cargadas estáticamente).....	55
Tabla 2.5. Criterios de aceptación-rechazo con ultrasonido (conexiones no tubulares cargadas cíclicamente a tracción).....	56
Tabla 2.6. Niveles de escaneo (conexiones no tubulares cargadas cíclicamente a tracción).....	56
Tabla 2.7. Descripción de los niveles de prueba.....	73
Tabla 2.8. Requerimientos pre ensayo.....	73
Tabla 2.9. Correcciones de sensibilidad y distancia.....	76
Tabla 2.10. Niveles de prueba y bloques de referencia.....	77
Tabla 2.11. Longitud y profundidad de las muescas en el bloque de referencia.....	79
Tabla 2.12. Diámetro de los orificios laterales.....	79
Tabla 2.13. Longitud de los orificios laterales y de las muescas superficiales para espesores $t > 25$ mm.....	79
Tabla. 2.14. Demostración de horas prácticas y entrenamiento para ser técnico en pruebas ultrasónicas.....	93

LISTADO DE SIGLAS Y SÍMBOLOS

a	Nivel de indicación
ACG	Ganancia con corrección de ángulo
ANSI	Instituto Americano de Estándares Nacionales
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
ASNT	Sociedad Estadounidense de Pruebas No Destructivas
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
AWS	Sociedad Americana de Soldadura
b	Nivel de referencia con corrección
c	Factor de atenuación
d	Clasificación de la indicación
DA	Distancia angular
DA_t	Distancia angular total
DAC	Curva de corrección de amplitud (Distance Amplitude Correction)
DS	Distancia superficial
EN	Normas Europea
END	Ensayos No Destructivos
FMC/TFM	Captura de matriz completa / Método de enfoque total
ISO	Organización Internacional de Normalización
LCD	Pantalla de cristal líquido
p_r	Profundidad de la discontinuidad
$Prof'$	Profundidad de la discontinuidad en segunda pierna
PP	Posición de la sonda (Probe Position)
R_a	Rugosidad (acabado superficial)
RC	Bloque de referencia para resolución
RECT	Radiofrecuencia rectificadora
RECTFW	Radiofrecuencia rectificadora de onda completa
RF	Radiofrecuencia
SD	Distancia de salto
t	Espesor
T	Tiempo de tránsito
TCG	Ganancia con corrección de tiempo
TOFD	Técnicas de difracción de tiempo de vuelo (Time of Flight Diffraction)
V	Velocidad del sonido
ZAT	Zona afectada térmicamente
λ	Amplitud de onda

INTRODUCCIÓN

El desempeño del Ingeniero Mecánico en el ámbito laboral, está íntimamente relacionado con la solución de todo tipo de problemas; en el campo de las pruebas no destructivas, el Ingeniero Mecánico debe conocer los principios y aplicaciones de las diversas técnicas para garantizar el control de calidad de productos y servicios de una empresa. En muchos países de América Latina, particularmente este país, el tema de ensayos no destructivos aún está en desarrollo, la impartición de estos conocimientos está exclusivamente controlada por la industria privada y todo Ingeniero Mecánico debe estar familiarizado con aspectos de este tipo. Existen empresas que brindan servicios de inspección a otras empresas como son la industria del petróleo, automotriz, aeronáutica, entre otras.

Dado lo anterior, es por ello que el presente trabajo de graduación está orientado a precisar conceptos básicos y otros más específicos sobre ensayos no destructivos por medio de ultrasonido, en el primer capítulo se logrará cubrir lo primordial sobre ensayos no destructivos por la técnica de ultrasonido así como también algunos procedimientos y métodos, principales equipos y accesorios a utilizar en estos tipos de ensayos, se describen ventajas y limitantes generales en comparación con otros ensayos, tanto en el aspecto teórico como en el ámbito práctico, esto con el propósito de comprender el principio de funcionamiento de equipos ultrasónicos. Al mismo tiempo se ha investigado sobre correctas prácticas para llevar a cabo estos ensayos.

Los equipos y accesorios que se utilizan para realizar estos ensayos, poseen un alto grado de precisión y cuentan con dispositivos de alto grado de sensibilidad, proporcionan un elevado nivel de exactitud en la posición, tamaño, orientación y forma de las discontinuidades volumétricas internas de un metal, este tipo de prácticas se realizan bajo la aplicación de normas internacionales y bajo la supervisión de personal debidamente calificado para una correcta inspección. Las bases teóricas que se plantean están orientadas a que sirvan

como apoyo bibliográfico tanto a personal académico y de investigación, así como también a personas que desempeñe o esté interesado(a) en el área de ensayos no destructivos por ultrasonido

En el segundo capítulo se ha propuesto y puesto a estudio algunas normativas que puedan ser aplicables a diferentes métodos y técnicas de ensayos por ultrasonido, con el objetivo de que en un futuro se puedan usar con un equipo adquirido por la escuela. El tercer capítulo consiste en dar una propuesta basada en la metodología de las normativas estudiadas, que pueda ser puesta en práctica en los laboratorios, tal procedimiento tendrá un enfoque a las técnicas de medición de espesores, analizar internamente metales y a detectar defectos internos a diferentes tipos de uniones soldadas.

1. MARCO TEÓRICO

Los ensayos por ultrasonido son prácticas no destructivas que posibilita caracterizar piezas y detectar defectos presentes sin la necesidad de alterar su estructura cristalina. Su funcionamiento está basado en la impedancia acústica que es el producto de la velocidad máxima de propagación del sonido en el material a evaluar y la densidad del material.

La técnica del ultrasonido consiste en un conjunto de ondas de alta frecuencia que son introducidas en los materiales para la detección de fallas internas. Las ondas de sonido viajan a través del material o medio de propagación y son reflejadas a la interface; esta señal reflejada se ve disminuida en la pantalla del equipo y es la que define la presencia y localización de fallas internas como micro fisuras, grietas, delaminaciones, inclusiones de escoria, porosidades, discontinuidades ocasionadas por algún maquinado o piezas que se han llevado a temperaturas altas de servicio, o lotes de materiales que se han llevado al taller para una revisión y correcta inspección [1].

Los ensayos mediante ultrasonidos también permiten la medida de espesores de materiales o piezas aun estando en servicio, permiten saber los espesores de películas protectoras, pinturas o recubrimientos. Cabe destacar que los equipos destinados para llevar a cabo estos ensayos son lo bastante prácticos y sofisticados para la determinación de imperfecciones, por lo que se requiere un conocimiento profundo de las bases del método como del dominio de la técnica, por parte de la persona que lo opere.

1.1. FUNDAMENTOS Y CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE EL ULTRASONIDO

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 y la principal diferencia entre las dos es la frecuencia más elevada

presente en el ultrasonido. Mientras el sonido audible tiene frecuencias entre 16 Hz y 20 kHz, la frecuencia del ultrasonido usada en ensayos ultrasónicos está en el intervalo de 20 kHz a 200 MHz (ver, Fig. 1.1), frecuencias que el oído humano no puede detectar [1].

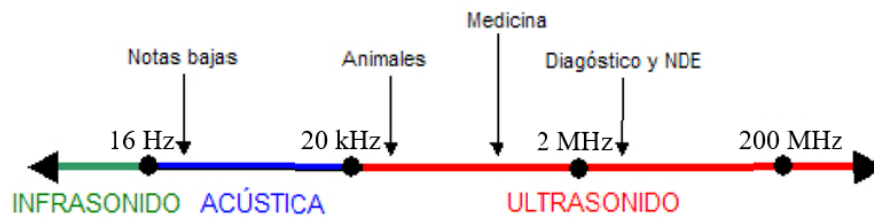


Fig. 1.1. Frecuencias del sonido.

Para generar un sonido de alta frecuencia en el material a examinar se utiliza un elemento transductor compuesto de un material piezoeléctrico (generalmente cristales de cuarzo), el cual tiene la habilidad de convertir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa [1].

Esta acción está sobre la base del 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 [1].

En la Fig. 1.2 se presenta un palpador, el cual tiene contacto con el material a inspeccionar, el transductor (material piezoeléctrico) es el componente fundamental del palpador [1].

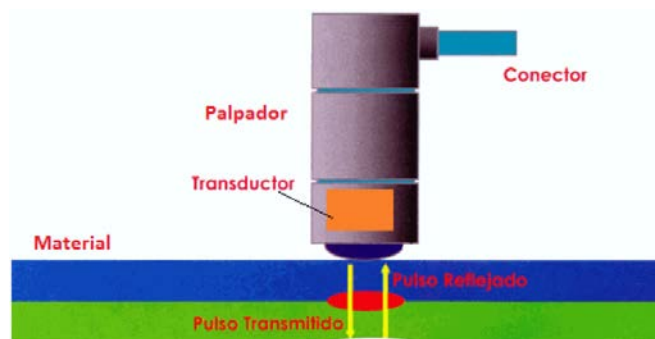


Fig. 1.2. Palpador-Transductor.

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 presenta en la Fig. 1.3. Si existiera alguna discontinuidad en el camino del haz, la energía del sonido se reflejaría 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 los materiales evaluados [1].

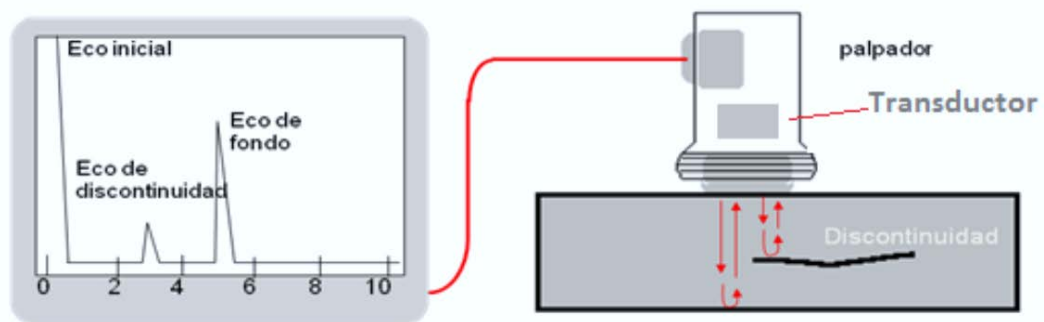


Fig. 1.3. Ensayo ultrasónico por pulso eco.

La amortiguación de las ondas es grande en gases e intermedia en líquidos. Puesto que el comportamiento y la propagación de los ultrasonidos son de naturaleza ondulatoria, para que una discontinuidad o defecto sea detectable mediante esta técnica, es necesario que su dimensión en el sentido de propagación de la onda sea mayor que una semilongitud de onda, pues únicamente en ese caso la onda atravesará con seguridad el defecto y aparecerá una variación de la intensidad sónica medida. Así pues, el límite de detección de esta técnica depende casi exclusivamente de la frecuencia de los ultrasonidos utilizados.

La velocidad de propagación depende fuertemente de la naturaleza sólida del medio. Así pues, las ondas de ultrasonidos sufrirán cambios bruscos al pasar de un medio a otro, lo cual aporta otra de las razones de su utilización.

Los ultrasonidos, de forma análoga a como lo hacen las ondas acústicas o luminosas, sufren fenómenos de reflexión, refracción y difusión, lo cual permite su utilización para el estudio de materiales.

Actualmente se utiliza un dispositivo que funciona como emisor y receptor, a este se le conoce como palpador o transductor ultrasónico, sobre la base de la propiedad característica del sonido de reflejarse al alcanzar una interface acústica. Los equipos de ultrasonido que se utilizan actualmente permiten detectar discontinuidades superficiales e internas, dependiendo del tipo de palpador utilizado y de las frecuencias que se seleccionen.

Las ondas ultrasónicas son generadas por un cristal o cerámico piezoeléctrico denominado transductor y que tiene la propiedad de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Al ser excitado eléctricamente el transductor vibra a altas frecuencias generando ultrasonido. Las vibraciones generadas son recibidas por el material que se va a inspeccionar, y durante el trayecto la intensidad de la energía sónica se atenúa proporcionalmente a la distancia del recorrido. Al alcanzar la frontera del material, el haz sónico es reflejado, y se recibe el eco por otro o el mismo transductor. Su señal es filtrada e incrementada para ser enviada a un equipo ultrasónico.

1.1.1. GENERACIÓN Y DETECCIÓN DE ULTRASONIDOS

Entre los diferentes procedimientos para la generación y detección de ondas de ultrasonidos, uno de los más habituales y de mayor interés es el método piezoeléctrico. Esto se basa en el fenómeno piezoeléctrico que consiste en la generación de cargas eléctricas por medio de sollicitaciones o presiones de naturaleza mecánica. Lo presentan muchos cristales, como el cuarzo, titanato de bario, sulfato de bario, sulfato de zinc, turmalina, que son los más comúnmente utilizados. El fenómeno piezoeléctrico es reversible, es decir, si se

aplica una diferencia de potencial a un cristal piezoeléctrico, este experimenta vibraciones mecánicas variables.

Así a grandes rasgos, el equipo debe pasar por cierta calibración por parte del usuario para asegurar su funcionamiento y diseño, previo al ensayo. El usuario debe utilizar un patrón o bloques de referencia para dicha calibración del equipo y validar niveles deseados de precisión. Cabe destacar que el material del patrón a utilizar debe ser el mismo que el material a inspeccionar.

Como se describió anteriormente, las ondas de ultrasonido son vibraciones mecánicas y las amplitudes de las vibraciones producen esfuerzos en las piezas por debajo de su límite elástico, de esta manera los materiales no producen deformaciones plásticas.

La técnica de ultrasonido permite conocer muchas variables en piezas de alta complejidad geométrica, entre otras, permite la inspección de espesores de tanques de almacenamiento, inspección de la pérdida de espesores en tuberías y el hallazgo de grietas en estructuras. Mediante estas técnicas se pueden evitar paradas inesperadas en la producción, daños severos que perjudiquen al medio ambiente y hasta posibles pérdidas humanas. Este método contribuye en la eficiencia de los procesos disminuyendo costos y riesgos.

Existe una gran variedad de materiales metálicos para la evaluación de ultrasonido, metales que se han obtenido por medio de fundiciones, metales forjados, tuberías con costura, sin costura, y todo tipo de soldaduras, entre otras. A 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 utilizada es posible correlacionar las propiedades acústicas del material con sus propiedades mecánicas.

1.2. EQUIPOS Y ACCESORIOS UTILIZADOS EN ENSAYOS POR ULTRASONIDO

Con el avance de la tecnología los equipos ultrasónicos han tenido cambios, pero el principio básico de funcionamiento sigue siendo el mismo. Las principales funciones consisten en proveer los mecanismos necesarios para proporcionar la señal eléctrica que el transductor emisor transforma en ondas de sonido, recibe y amplifica la señal eléctrica del transductor receptor y finalmente presentar en pantalla las dos señales, es decir la emitida y la recibida.

En esencia todos los equipos ultrasónicos cumplen la función de generar y recibir señales eléctricas, mismas que son medidas e interpretadas con ayuda de distintos accesorios que proporcionan algunos modelos diversos. Básicamente en el mercado existen detectores de fallas y medidores de espesores, con diferentes presentaciones y funciones que facilitan el trabajo de interpretación del inspector, sin embargo, no todos los equipos disponen con las mismas funciones básicas, para configurar los parámetros más importantes de la inspección como son la frecuencia, la distancia, entre otros.

1.2.1. TIPOS DE EQUIPOS ULTRASÓNICOS

Los instrumentos ultrasónicos son equipos de comparación contra un estándar de referencia, por lo tanto, un instrumento ultrasónico se debe calibrar antes de ser utilizado. Entonces, se puede decir que la calibración es el proceso de ajustar el instrumento utilizando un estándar de referencia.

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

En el funcionamiento de un instrumento ultrasónico se incluye la determinación del tiempo de aparición y de la amplitud de la señal; como accesorios que se pueden encontrar integrados se puede mencionar la Curva de Corrección de la Amplitud (DAC) en función de la distancia electrónica, compuertas, monitor, medición de espesores digitalmente y cálculos matemáticos de distancias, también en forma digital.

1.2.2. EQUIPOS COMO DETECTORES DE FALLAS

El propósito fundamental de una prueba con ultrasonido es la detección de alguna posible discontinuidad en un material.

Existen diversos modelos en detectores de fallas, que van desde los más básicos (ver, Fig. 1.4) con funciones principales, calibraciones manuales, tienen baja definición y poca resolución [2].

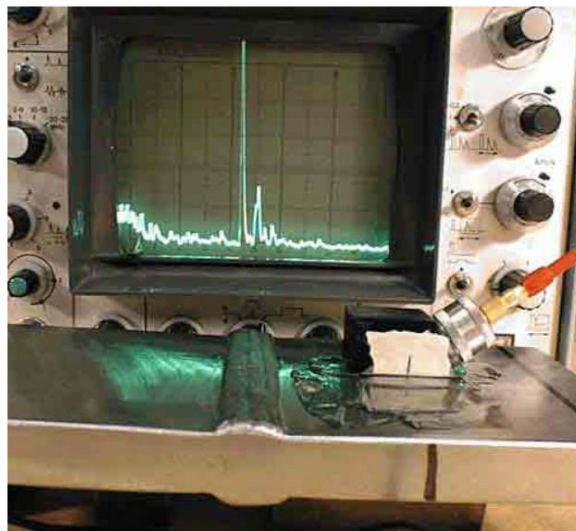


Fig. 1.4. Equipo detector de fallas analógico.

Así, también existen equipos más avanzados que disponen de la función de poder almacenar datos y calibraciones (ver, Fig. 1.5), además calibrarse en modo automático e incluso se pueden evaluar discontinuidades con funciones

como la corrección de la amplitud en función de la distancia (curva DAC). La resolución es mayor la de estos equipos, la visibilidad de las ondas y el color de fondo de la pantalla proporciona una mejor apreciación para un mejor contraste con el medio [2].



Fig. 1.5. Detector de fallas con pantalla LCD.

Otra característica de estos nuevos instrumentos, son las lecturas que proporcionan cuando alguna compuerta toca una indicación. Algunos equipos las identifican, en el caso de trabajar con haz angular, como “distancia superficial”, “distancia angular” desde el punto índice del transductor hasta la discontinuidad y la “profundidad de la discontinuidad” (p_r), entre otras [3].

Los equipos más avanzados en el campo de la detección de fallas son los detectores con arreglo de fases (ver, Fig. 1.6), una técnica que trabaja con el mismo principio del ultrasonido, pero con la ventaja de emitir múltiples señales por medio de transductores especiales que pueden contener hasta 128 cristales, para que el equipo proporcione una imagen definida del interior de la pieza, y con esto realizar interpretaciones más rápidas y sencillas. En la Fig. 1.6 se presenta un barrido sectorial o barrido “S”.



Fig. 1.6. Inspección con Arreglo de Fases (fase array).

1.2.3. EQUIPOS COMO MEDIDORES DE ESPESOR

Estos tipos de instrumentos están diseñados, específicamente, para determinar las dimensiones del espesor de algún material y determinar si existe algún desgaste por corrosión producida por la reacción entre un fluido contenido y las paredes internas del elemento de inspección. Los programas que controlan estos dispositivos, realizan una compensación automática del viaje de la onda ultrasónica, debido a la configuración de transductores duales, que son contruidos con una ligera inclinación de los cristales para provocar una focalización que le proporciona la sensibilidad necesaria a la inspección. A causa de esta inclinación, el viaje de la onda resulta ser mayor, y el cálculo final del recorrido del viaje depende de la eficiencia del instrumento para realizar la compensación.

Dentro de la variedad de medidores de espesores, se pueden encontrar modelos básicos que proporcionan únicamente valores numéricos del espesor; sin embargo, aún el modelo más austero dispone de funciones para modificar la velocidad de propagación en el material, así como el retardo del palpador para poder ejecutar una calibración en distancia del instrumento. En la Fig. 1.7 se presenta un equipo básico medidor de espesores [3].



Fig. 1.7. Medidor de espesores básico.

Así también es posible recurrir a instrumentos de alta precisión en espesores pequeños, que trabajan con ayuda de transductores especiales de diámetros reducidos y altas frecuencias como el que se presenta en la Fig. 1.8 [2].



Fig. 1.8. Medidor de espesores de alta precisión.

1.2.4. PALPADORES (TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS)

Los palpadores se clasifican de acuerdo con el propósito al cual van a servir. Por lo tanto, se distinguen; palpadores de contacto directo, palpadores de inmersión y palpadores de escobilla (paintbrush), entre otros, así:

➤ **Palpador de contacto.**

Es un palpador que se coloca directamente en la superficie de prueba aplicando presión y un medio de acoplamiento de por medio. Estos emiten ondas longitudinales con frecuencias de 0.5 a 10 MHz, son bastante útiles en la detección de discontinuidades y en la medición de espesores. En la Fig. 1.9 se puede apreciar un palpador de contacto.



Fig. 1.9. Representación de cómo se propagan las ondas ultrasónicas en la pieza analizada.

➤ **Palpador de elemento dual.**

Consiste en dos cristales que emiten ondas longitudinales (una transmisora y una receptora) encapsulados en la misma pieza y aisladas una de la otra por una barrera acústica. Los cristales se encuentran en un ángulo determinado uno del otro de modo tal que la señal rebote al alcanzar el final de la pieza analizada con un patrón en forma de V (ver, Figs. 1.10 y 1.11). Los palpadores de elemento dual generalmente ofrecen lecturas más consistentes en partes corroídas, y también puede ser usado en ambientes con alta temperatura [3].

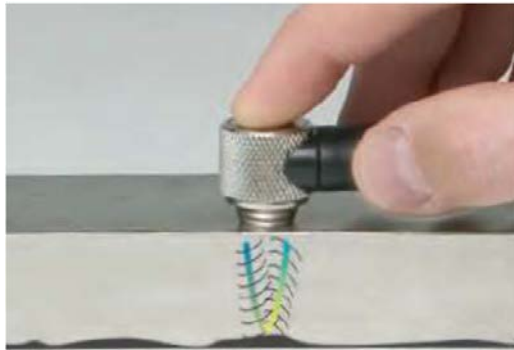


Fig. 1.10. Funcionamiento de un palpador de elemento dual.

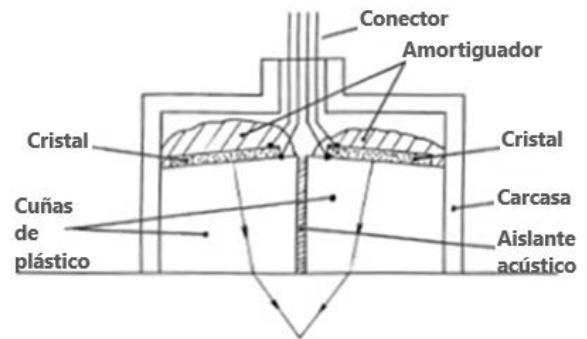


Fig. 1.11. Esquema que presenta en detalle el palpador de elemento dual.

➤ Palpadores de incidencia angular.

Los transductores de haz angular crean un haz ultrasónico en ángulos específicos hacia la superficie de inspección. La mayoría de los transductores de haz angular generan ondas de corte en el material de inspección, por refracción y conversión de modo de una onda de compresión [3].

Se encuentran disponibles en una variedad de diseños, por ejemplo: Con zapatas intercambiables o integradas comúnmente fabricados de polímeros, como acrílico o poliestireno, pueden ser materiales para alta temperatura y generalmente están montados en zapatas con ángulos estándar de 30, 45, 60 y 70°. En la Fig. 1.12 se presenta la aplicación.

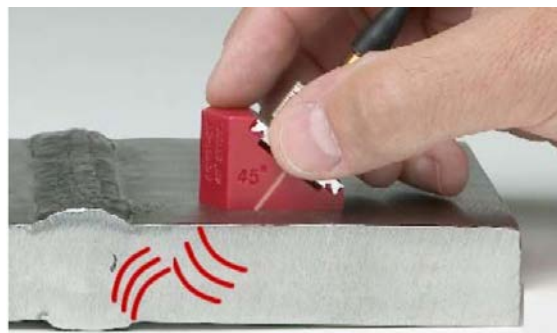


Fig. 1.12. Ondas ultrasónicas con un palpador angular de 45°.

Las aplicaciones más importantes son la inspección de uniones soldadas, detección y dimensionamiento de grietas, inspección de sistemas de tuberías, forjas, fundiciones y componentes estructurales.

Transductores de alto amortiguamiento pueden ser utilizados en técnicas de difracción de tiempo de vuelo (TOFD).

➤ Palpadores de línea retrasada.

Son palpadores de un sólo elemento diseñado para incorporar una pequeña pieza plástica o de material epóxico enfrente del elemento piezométrico del palpador. Ofrecen una mejorada resolución para detectar defectos muy cercanos a la superficie. Se pueden modificar para ajustar a la geometría superficial de una pieza y también se puede utilizar en aplicaciones a alta temperatura, las Figs. 1.13 y 1.14 se presentan palpadores de este tipo [3].



Fig. 1.13. Forma de uso de un palpador de línea retrasada.



Fig. 1.14. Diferentes tipos de palpadores de línea de retardo.

➤ Palpadores de cara protegida.

Están compuestos de un sólo material piezométrico enviando una señal longitudinal que tiene una camisa la que le permite conectarle una línea de retraso, una tapa, o una membrana. Esto los hace extremadamente versátiles para cubrir una muy amplia variedad de aplicaciones. También, se pueden usar como un palpador en contacto directo con materiales de baja impedancia tales como la goma o el plástico mejorando la impedancia acústica, inspección en altas temperaturas, y excelente para detectar espesores en haz recto. En la Fig. 1.15 se presenta estos palpadores [3].



Fig. 1.15. Palpadores de cara protegida o suela protegida.

➤ Palpadores de inmersión.

Estos están compuestos de un sólo material piezométrico enviando una señal longitudinal, donde la cara utilizada tiene una impedancia que es compatible con la del agua. Estos palpadores vienen sellados lo que les permite sumergirse completamente en agua, en conjunto con un cable a prueba de agua. Se usa agua como acoplante, estos son ideales en aplicaciones de escaneo donde es difícil tener un buen contacto con el acoplante por el tipo de superficie de la pieza, también tienen la opción de ser enfocados para incrementar la intensidad del sonido en un área específica y disminuir el tamaño del punto del haz sonoro. En la Fig. 1.16 se presenta esta aplicación [3].

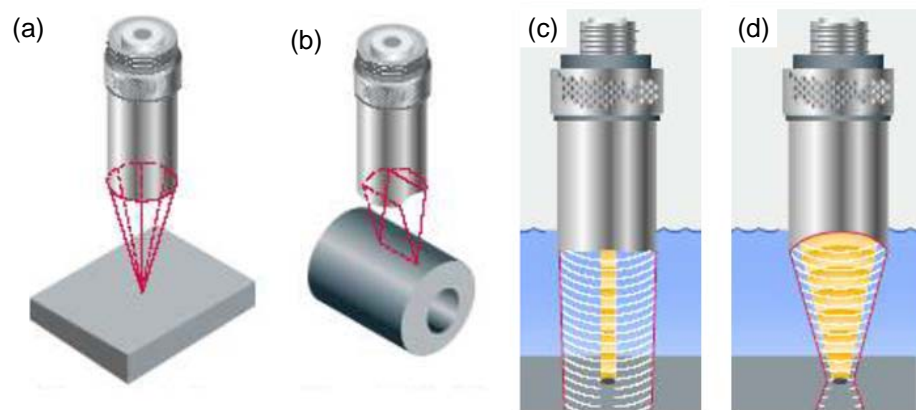


Fig. 1.16. Modelos de palpadores de inmersión: (a) Foco esférico; (b) foco cilíndrico; (c) No enfocado; y (d) Enfocado.

➤ Palpadores de alta frecuencia.

Pueden ser de línea retrasada o de inmersión enfocada y están disponibles en los rangos de frecuencias entre 20 y 225 MHz. Con estos se

pueden medir espesores de materiales muy delgados (dependiendo del material, el palpador, la condición de la superficie y la temperatura). En la Fig. 1.17 se presenta estos tipos de palpadores [3].



Fig. 1.17. Palpadores de alta frecuencia.

1.2.5. FACTORES A CONSIDERAR EN LA ELECCIÓN DEL TRANSDUCTOR

Entre los factores que influyen en la elección del transductor se describen los siguientes [3]:

- 1) Clase de cristal: Con la elección de cada clase de cristal se puede variar el poder resolutivo y la sensibilidad de los transductores.
- 2) Diámetro del cristal: Entre mayor sea el diámetro del cristal se obtiene una mayor profundidad de penetración, así mismo una mayor longitud en un campo cercano y una menor divergencia.
- 3) Frecuencia: Con la elección de una mayor frecuencia se obtiene mayor posibilidad para la identificación de discontinuidades pequeñas, mayor longitud de campo cercano, mayor poder resolutivo, menor profundidad de penetración y mínima divergencia. 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 lo tanto se hace más frágil. Debido a esto, es común que en los ensayos por contacto directo no se superen los 10 MHz.

La capacidad de un palpador está expresada en términos de la sensibilidad y la resolución que éste posea:

- ✓ 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.
- ✓ 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.

1.2.6. ACCESORIOS PARA CALIBRAR EL EQUIPO ULTRASÓNICO

En los ensayos de ultrasonido también se necesitan estándares de referencia (ver, Fig. 1.18). Estos son utilizados para establecer un nivel general de consistencia en la medición y ayudar a interpretar y cuantificar la información adquirida.



Fig. 1.18. Estándares de referencia

Estos patrones ayudan a estimar el tamaño de las imperfecciones. La selección del bloque de calibración es fundamental para garantizar una evaluación precisa. La forma y el material del bloque de calibración deben ser

los adecuados para el material sometido a inspección. Así, en la Fig. 1.19 se presenta algunos patrones de calibración.

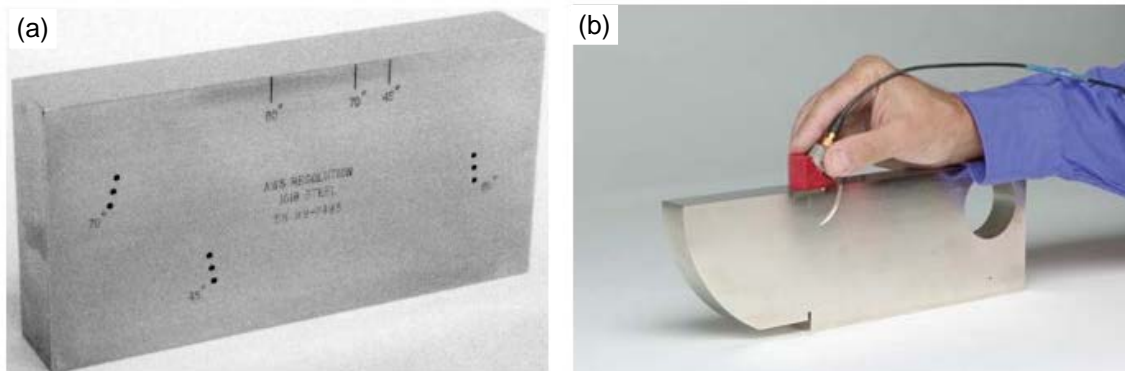


Fig. 1.19. Patrones o bloques: (a) De discontinuidades; y (b) de referencia para calibración del equipo.

Del mismo modo, existe patrones para calibrar las distancias de espesores, los equipos ultrasónicos utilizan palpadores de haz recto para la correcta calibración, estos patrones se presentan en la Fig. 1.20.



Fig. 1.20. Patrón de medición de espesores tipo cilindros.

Para una correcta inspección ultrasónica es necesario utilizar un gel como acoplante es por eso que se detallan las principales funciones que son:

- Llevar la mayor cantidad de energía acústica del transductor a la pieza a ensayar.

- Recuperar la mayor parte de la energía acústica reflejada por un defecto en el transductor.

La energía del sonido se ve afectada por la densidad del material a través del cual viaja, no viaja bien entre el aire (baja densidad) y los sólidos (alta densidad). Entonces, para que la energía acústica pase del transductor (un sólido) a la pieza de ensayo (otro sólido), es necesario usar un acoplante ultrasónico [4].

Una pieza con una superficie rugosa dificultará el paso de la energía acústica, es por eso que se deberá utilizar un acoplante más viscoso el cual rellenará los huecos y las crestas de la superficie de la pieza.

Si la pieza o el área de ensayo es relativamente grande, es importante utilizar un acoplante que sea autonivelante para minimizar la cantidad de tiempo empleado en aplicarlo. Además, un acoplante con buenas características de humectación ayudará a garantizar una transmisión ininterrumpida durante una inspección ultrasónica [4].

Para la aplicación donde la temperatura sea alta, es importante utilizar un acoplante específicamente formulado para resistir altas temperaturas, ya que uno de uso general no transmitirá la energía acústica y se puede quemar o incendiar. Una de las consideraciones que se deben tener en cuenta es que en temperaturas extremas la viscosidad del acoplante aumentará a temperaturas más bajas y bajará a temperaturas altas. Por lo tanto, se debe elegir un acoplante que dé la viscosidad deseada durante la inspección.

Para la aplicación de grandes áreas se requiere un acoplante que no se seque con el tiempo. Se debe elegir un acoplante a base de glicol o silicona con excelentes propiedades de protección contra la corrosión a largo plazo.

La clave para encontrar el mejor acoplante para su adecuada aplicación es equilibrar precio y rendimiento. Para inspeccionar piezas costosas, críticas o de precisión, es esencial utilizar un acoplante aprobado por un fabricante confiable [4].

1.3. APLICACIONES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ULTRASONIDO

El hecho de que la inspección ultrasónica se base en un fenómeno mecánico, se permite adaptar para determinar la estructura de los materiales de ingeniería de manera íntegra; se utiliza en el control de calidad e inspección de materiales en diferentes áreas de la industria.

Entre sus aplicaciones más importantes se tienen:

- a) Detección y caracterización de discontinuidades en el interior de materiales.
- b) Medición de espesores, extensión y grado de corrosión presente en un elemento o pieza.
- c) Definir características de uniones entre materiales.
- d) Evaluación de la influencia de variables de proceso en el material.

A continuación, se presentan los principales beneficios de los Ensayos No Destructivos (END) por ultrasonido:

- a) El equipo ultrasónico es portátil.
- b) Solo se requiere una superficie de acceso.
- c) Mayor poder de penetración, lo que permite la medición de grandes espesores.
- d) Alta sensibilidad, lo que facilita la inspección de discontinuidades internas extremadamente pequeñas, como grietas por tratamiento térmico, fisuras de piezas que han sido sometidas a esfuerzos y otras que no se pudieran detectar por radiografía.
- e) En algunos equipos se puede determinar con exactitud la posición de las discontinuidades internas, se estima el tamaño, la orientación, la forma y la naturaleza de estas. La ubicación, la evaluación del tamaño y la interpretación de las discontinuidades encontradas son factores intrínsecos en el examen ultrasónico, mientras que otros exámenes no definen tales factores, por ej. se presenta un defecto en una película radiográfica, esta define el tamaño, pero no su profundidad y en muchos casos este es un factor importante para realizar una reparación.

- f) 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.
- g) El ensayo por ultrasonido es seguro, no compromete la seguridad y salud del operario, comparado con los riesgos de la radiografía industrial.
- h) La capacidad de exploración permite inspeccionar un volumen de metal que se extiende desde la superficie superior, hasta la superficie posterior en el caso de soldaduras.
- i) Los equipos actuales proporcionan la posibilidad de almacenar información en memoria, la cual se puede procesar digitalmente por computadora para caracterizar la información almacenada.
- j) A diferencia de las pruebas por radiación, las pruebas ultrasónicas no requieren planes de seguridad especiales ni accesorios para su aplicación.

Entre las limitantes que se encuentran en la inspección por ultrasonido son las siguientes:

- a) El funcionamiento manual hace necesario de técnicos experimentados, tanto para el desarrollo de los procedimientos de inspección, el adecuado uso de los equipos, como también, en conocimiento para la interpretación de los resultados obtenidos.
- b) Son difíciles de inspeccionar las secciones del material que son ásperas, de formas irregulares, muy pequeñas, delgadas o heterogéneas.
- c) En los casos de inspección en soldaduras, es necesario retirar completamente el refuerzo de soldadura, lo que requiere tiempo de fábrica.
- d) Es necesario material acoplante para proporcionar una transferencia efectiva de la energía de onda ultrasónica, entre las unidades de barrido y las partes que se inspeccionan.
- e) Se requieren patrones o bloques de referencia para calibrar el equipo.

1.4. ENSAYOS Y TÉCNICAS POR ULTRASONIDO

Cada método de ensayo no destructivo (END) aplicando ultrasonido conlleva sus propias técnicas de ensayo, las diferentes técnicas aplicables son propias del método que se aplique. El personal que las aplica debe contar con experiencia adecuada para cada método que se quiera aplicar, así como destrezas que adquieren con las horas ensayadas.

Del mismo modo existen requisitos y normas específicas para cada método de ensayo, estas se deben respetar para cumplir con el procedimiento cada ensayo ultrasónico.

A continuación, se describen diferentes tipos de ensayo ultrasónico para la detección de discontinuidades, estos son los siguientes:

1.4.1. ENSAYO ULTRASÓNICO POR PULSO-ECO

El método de pulso eco 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, éstas aparecen en pantalla las señales de reflexión del haz ultrasónico que indican la presencia de la discontinuidad. Si no existe presencia de estas señales la pieza no tiene defectos tal como se presenta en la Fig. 1.21.

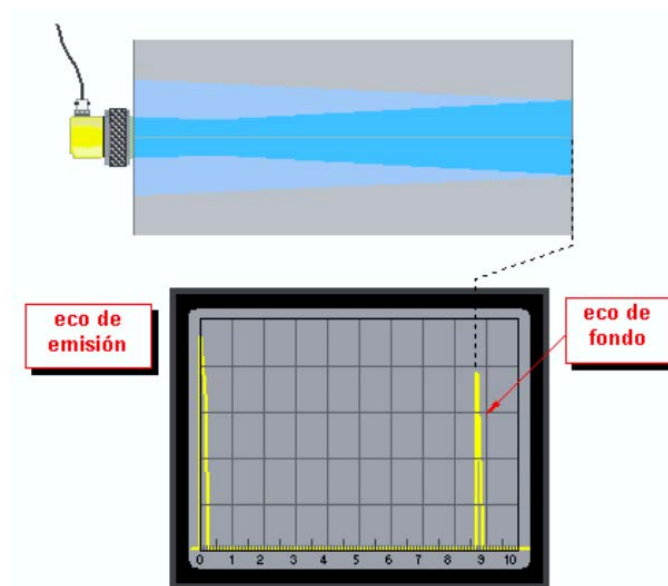


Fig. 1.21. Elemento sin defectos.

El grupo de ondas enviado a la pieza se refleja en la superficie del fondo, o en la superficie de cualquier discontinuidad, y las señales que regresan son captadas por el transductor y presentadas en la pantalla. Si el transductor está acoplado a una pieza que no tiene discontinuidades, aparecerán únicamente en la pantalla dos ecos (ver, Fig. 1.21) [4]:

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

Puesto que se puede medir el tiempo de recorrido y se conoce la velocidad del sonido en el medio ensayado este método permite establecer la distancia que existe entre el cabezal y las superficies reflectantes, sean estas superficies de la pieza o discontinuidades internas. Por eso este método es muy utilizado.

En la Fig. 1.22 se presenta 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 [4].

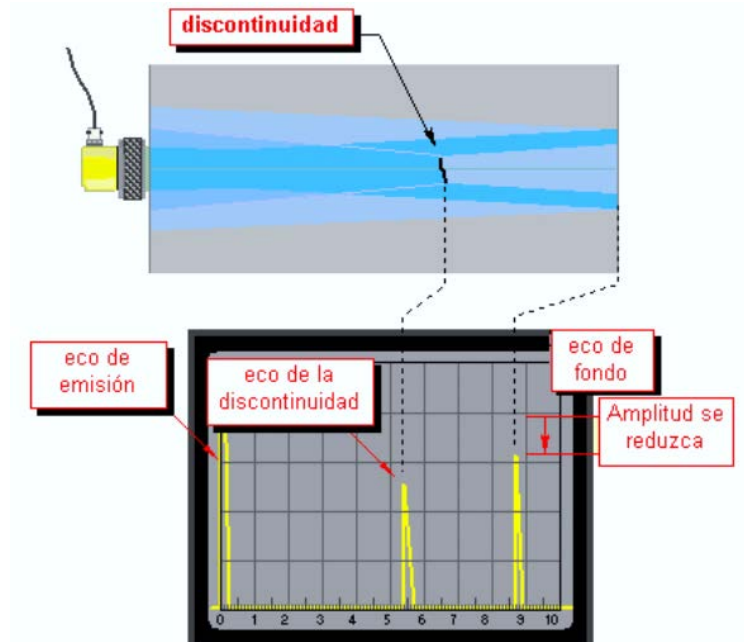


Fig. 1.22. Representación Pulso-Eco en material con defecto.

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 Figs. 1.21 y 1.22.

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, Fig. 1.23).

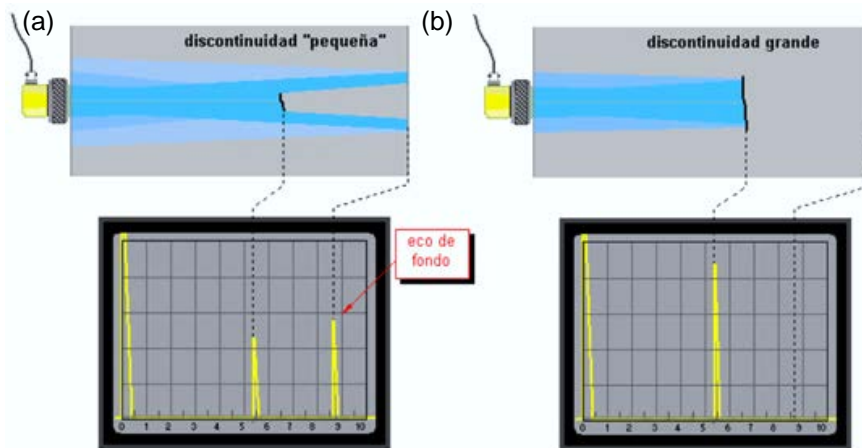


Fig. 1.23. Variabilidad del eco de fondo: (a) Discontinuidad pequeña; y (b) discontinuidad grande.

A continuación, en la Fig. 1.24 se presentan ejemplos de otros casos posibles de reflexión [4].

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 Fig. 1.25, 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 [4].

Para interpretar adecuadamente la información, los equipos deben estar calibrados correctamente [4].

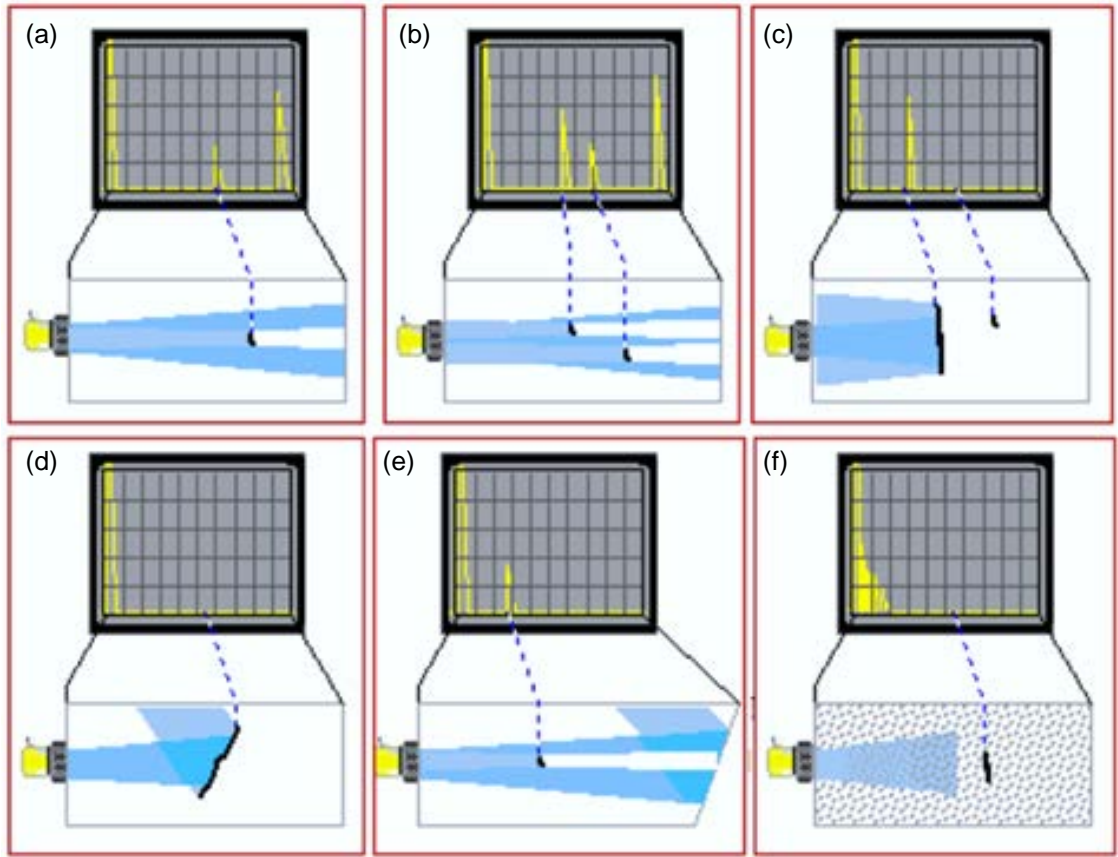


Fig. 1.24. Ecos posibles de reflexión.

(a) El reflector es pequeño en relación con la sección del haz; en pantalla se mostrará el eco del reflector y el eco de fondo; (b) Para dos reflectores de menor tamaño que la sección recta del haz; la pantalla mostrará tres ecos, dos de ellos de los reflectores y el tercero del eco de fondo; (c) Cuando existen 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; (d) Un reflector, mayor que el haz, inclinado un ángulo tal que no se refleje; no aparecerá eco en la pantalla; (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; y (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:

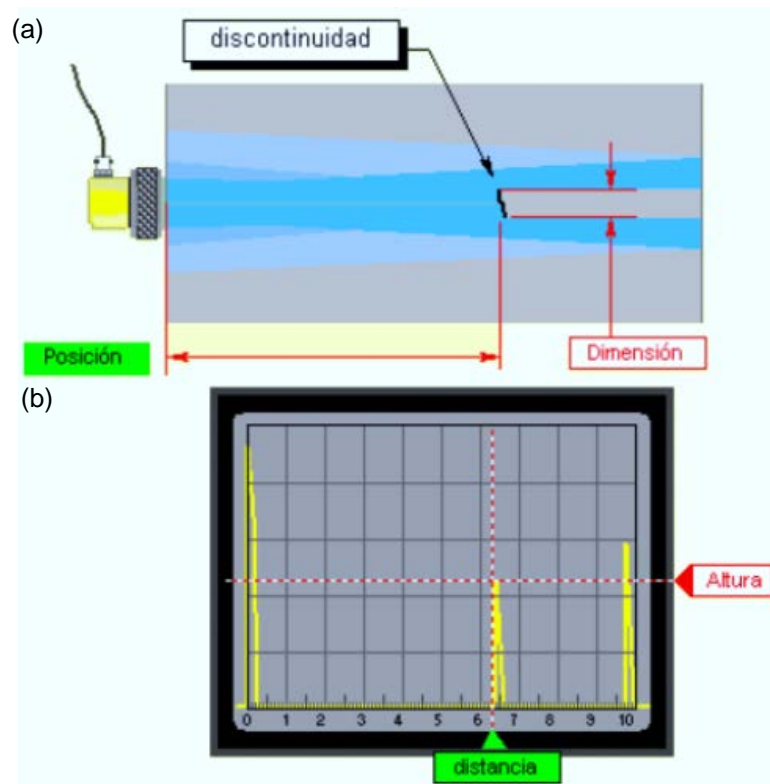


Fig. 1.25. Posición y dimensión de una discontinuidad: (a) Discontinuidad detectada por el haz ultrasónico; (b) Distancia y altura de la discontinuidad.

1.4.2. ENSAYO ULTRASÓNICO POR CONTACTO (TÉCNICA DE ULTRASONIDO)

En esta 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 acoplante. Esta técnica se usa en casi la totalidad de ensayos manuales, donde el operador realiza el ensayo desplazando manualmente el palpador ya sea normal a la superficie o utilizando un palpador angular (ver, Fig. 1.26).

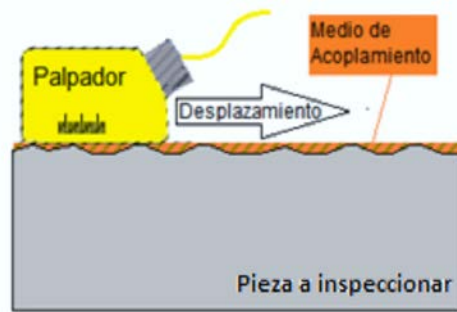


Fig. 1.26. Demostración de un ensayo ultrasónico por contacto.

1.4.3. ENSAYO ULTRASÓNICO POR TRANSMISIÓN

En este ensayo se utilizan dos transductores, uno que actúa como emisor (T) de alta frecuencia y otro como receptor (R) del haz ultrasónico, (ver, Fig. 1.27). Una limitante de este método es que no ofrece información de profundidad. Sólo puede detectar la presencia de discontinuidades que reducen la propagación del sonido que llega al receptor. Cuando no existen discontinuidades, la señal recibida tendrá la máxima amplitud o muy cercana a la de emisión [4].

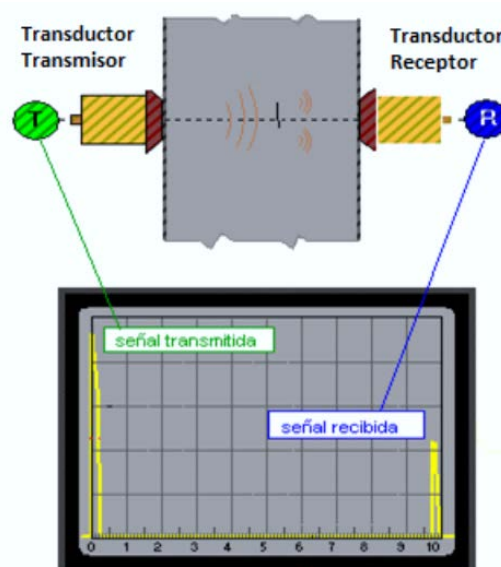


Fig. 1.27. Demostración esquemática de un ensayo ultrasónico por transmisión.

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 existen defectos. De esta forma se presenta en la Fig. 1.28 ejemplo 1 que no existen 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 método se encuentra: transmisión directa, reflexión y 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, así [4]:

➤ Método de transmisión directa.

Este método es que se explicaba anteriormente en donde los dos transmisores (transmisor y receptor) están situados uno frente al otro en las dos superficies opuestas de la pieza examinada. Una desventaja de este método es que para el caso que no se pueda colocar el palpador receptor en el lado opuesto de la pieza no se podrá cumplir con el objetivo de examinar la pieza.

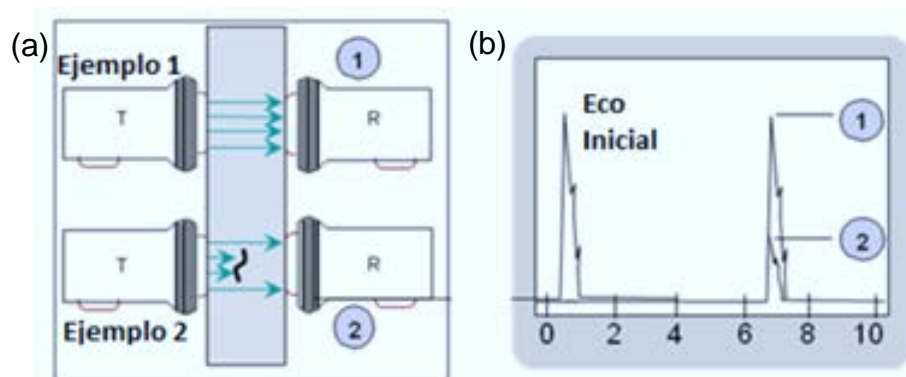


Fig. 1.28. Método de transmisión: (a) Transductor emisor y receptor en una pieza sin defecto y con defecto interno; y (b) eco inicial y eco final sin defecto y eco final con defecto en la pieza analizada.

➤ 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 (ver, Fig. 1.29). Como se

decía que el debilitamiento de la señal que recibe el receptor indica la presencia de una discontinuidad, 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.

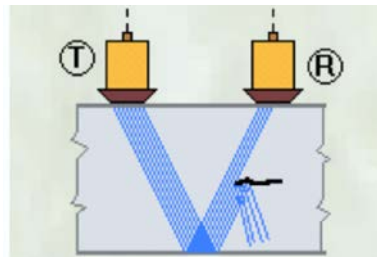


Fig. 1.29. Método de transmisión con reflexión.

1.4.4. ENSAYO ULTRASÓNICO POR INMERSIÓN

El principio básico de este ensayo consiste en utilizar el agua como medio de acoplamiento acústico entre el transductor y la pieza a examinar, que, a diferencia de las técnicas tradicionales por contacto, el transductor y la pieza son sumergidos total o parcialmente en un tanque con agua de tal manera que no se requiere tener contacto entre ellos, ya que la onda de ultrasonido viaja a través del agua hasta penetrar en la pieza (ver, Fig. 1.30). Es importante que el agua contenga agentes antioxidantes, anticorrosión y que no contengan burbujas para la realización de la prueba [3].

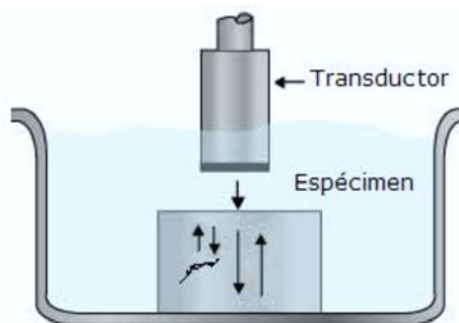


Fig. 1.30. Técnica de Inmersión.

La técnica de inmersión se aplica normalmente en ensayos automatizados como el de la Fig. 1.31, en series o en casos en los que un gran número de piezas tienen la misma geometría, para explorar las piezas de manera automática.

En algunos sistemas la pieza se mueve, y en otros permanece quieta (o a veces gira sobre su eje) en el cual el transductor se mueve para explorar la pieza.

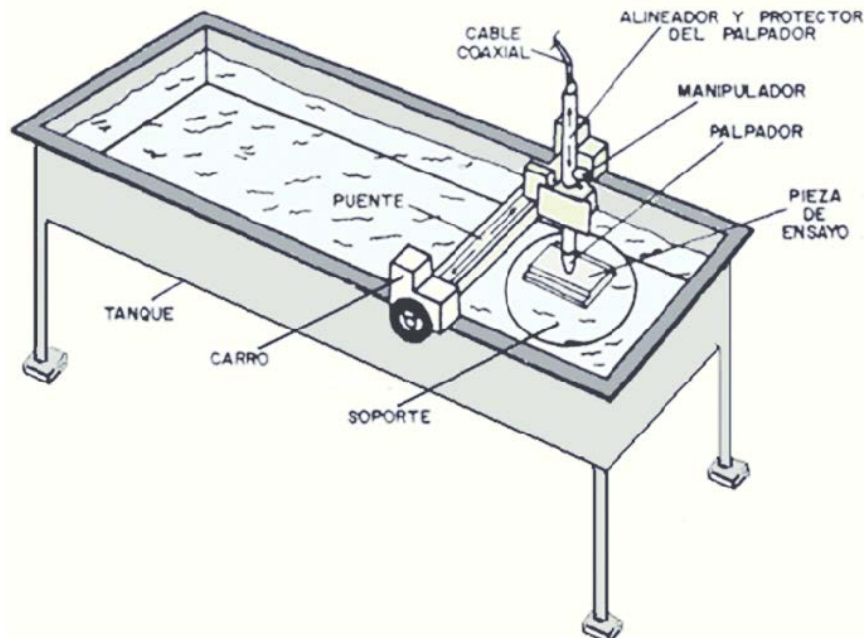


Fig. 1.31. Sistema de inmersión en el que la pieza permanece inmóvil.

1.5. NORMAS PARA LA APLICACIÓN DE ENSAYOS POR ULTRASONIDO

Existen diversidad de normas para llevar a cabo los ensayos no destructivos por ultrasonido, pero en este informe se dará la propuesta de las normas aplicables para los métodos más comunes, comenzando por la aplicación para medición de espesores luego para la aplicación de soldaduras y por último se hará una propuesta para hacer uso de la técnica Matriz en Fase (Phased Array).

Para la aplicación de medición de espesores existen las siguientes normativas:

- ✓ La norma E797 de la ASTM, es una práctica estándar para la medición de espesores por ultrasonido aplicando la técnica de contacto manual pulso-eco e indica la forma de calibración del equipo, además hace mención varias recomendaciones para obtener un mejor resultado en el instante de realizar dicha práctica;
- ✓ La EN 14127 hace especificación a los principios para la medición ultrasónica del espesor de materiales metálicos y no metálicos por contacto directo; y
- ✓ La EN 15317 especifica los métodos y criterios de aceptación para evaluar el rendimiento de los instrumentos para medir el espesor mediante ultrasonido pulso-eco.

Para la aplicación de detección de discontinuidades en soldaduras son bien utilizadas las siguientes normas:

- ✓ El código D1.1 de la Sociedad Americana de **Soldadura** (AWS) en la sección de inspección de ensayos no destructivos (END), es aplicado para soldaduras de piezas a tope;
- ✓ La norma 11666 de la Organización Internacional de Normalización (ISO) es aplicada a la inspección de soldaduras de acero ferrítico con penetración total, en espesores que van desde los 8 mm hasta los 100 mm; y
- ✓ La norma 15626 de la ISO, este documento especifica los niveles de aceptación para la técnica de difracción de tiempo de vuelo (TOFD) de soldaduras de penetración completa en aceros ferríticos desde 6 mm hasta 300 mm de espesor.

Para la utilización de la técnica Matriz en Fase (Phased Array) se hace la propuesta de hacer uso de la norma 13588 de la ISO usando la tecnología matriz de fase en soldaduras. También se podría hacer uso del código de la ASME sección V, así también aplicar la norma E2700 de la ASTM.

2. DISEÑO DE NORMATIVAS PROPUESTAS A ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS POR ULTRASONIDO

Primeramente, definir que la normalización es el proceso de elaboración, aplicación y mejora de las normas que son aplicadas a distintas actividades científicas, industriales o económicas con el fin de ordenarlas y mejorarlas. Al mismo tiempo es la redacción y aprobación de normas que se establecen para garantizar el acoplamiento de elementos construidos independientemente, así también garantiza la calidad de los elementos fabricados y la seguridad de su funcionamiento.

2.1. GENERALIDADES

El diseño de normativas consistirá en el estudio científico y técnico de una secuencia de procedimientos que serán aplicados por personal altamente capacitado en ensayos no destructivos por ultrasonido, estos procedimientos servirán para la determinación de características y/o cualidades de partes y productos que por lo regular se encuentran prestando servicio.

La función principal de una normativa es que sirva como guía práctica aplicable para la inspección de todo material. Cada inspección puede estar gobernada por uno o más procedimientos que han sido elaborados y estructurados para cumplir reglas o criterios de los documentos aplicables. Para cumplir con los objetivos y requisitos de estos documentos, el personal deberá estar capacitado con el manejo e interpretación de documentos aplicables al método al cual está calificado, además, debe ser capaz de elaborar procedimientos escritos e interpretar los resultados de la inspección, basándose en los requisitos tomados de los documentos aplicables al producto o material inspeccionado, y por último, debe asegurar que el personal que realiza actividades de inspección documentada en procedimientos, cumpla con la variedad de requisitos y reglas aplicables a cada ensayo.

2.1.1. PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN

Se debe entender como procedimiento de inspección como aquel documento que lleva una secuencia ordenada de acciones que describen como se aplica una técnica específica que define los parámetros técnicos, requisitos de equipos y accesorios, así como los criterios de aceptación y rechazo que son aplicables a materiales, componentes y/o equipos, todo de acuerdo con lo establecido en los códigos, normas y/o especificaciones [4].

El alcance de un procedimiento de inspección es intentar abarcar componentes complejos o críticos o un grupo de artículos semejantes.

A continuación, se mencionan aspectos básicos para un correcto procedimiento de inspección:

- ✓ Apego a los documentos aplicables (códigos, normas y/o especificaciones);
- ✓ Se debe mantener homogénea la técnica de inspección;
- ✓ El criterio de aceptación y rechazo debe ser homogéneo;
- ✓ Se debe mantener un nivel de calidad constante de los productos inspeccionados;
- ✓ Se obtienen resultados repetitivos; y
- ✓ Evitar discrepancias entre fabricante y comprador durante la inspección de recepción de materiales, cuando el comprador está enterado y ha autorizado la aplicación del procedimiento.

Sobre la base de los documentos aplicables, los procedimientos de inspección deben ser elaborados preferentemente por un técnico nivel II o III, calificado y certificado en el método de inspección aplicable. Además, deben ser revisados y aprobados por otro técnico nivel III, calificado y certificado en el método de inspección aplicable. El procedimiento deberá contener cada aspecto que el técnico necesitará saber para llevar a cabo la inspección, por lo que antes de elaborar un procedimiento de inspección se deberían considerar varios aspectos importantes, como los siguientes:

- ✓ Definir los documentos que se aplican, por acuerdo entre el prestador del servicio y el cliente, tales como: especificaciones del cliente, códigos, normas, dibujos, pedido, entre otros;
- ✓ Definir el alcance y requisitos específicos;
- ✓ Verificar los requisitos específicos que se aplican y están contenidos en: notas técnicas, planos, especificaciones, pedido, entre otros;
- ✓ Determinar los equipos y accesorios necesarios;
- ✓ Definir los niveles de calidad requeridos;
- ✓ Considerar los programas de fabricación o mantenimiento, para que se puedan determinar los puntos críticos de la inspección como: las áreas de interés, la etapa de la inspección, la preparación de las superficies, entre otros; y
- ✓ Seleccionar y preparar las muestras en caso que sea requerida la calificación del procedimiento.

En el código ASME sección 5 artículo 5 (Métodos de examen ultrasónico para materiales) se hace énfasis en que los exámenes se deberán realizar de acuerdo con un procedimiento escrito, que contendrá, como mínimo, los requisitos siguientes:

- ✓ Tipos de materiales y configuración a examinar, incluidas las dimensiones de espesor y la forma del producto (ya sea para fundiciones, forjas, placas, etc.);
- ✓ Requisitos de desempeño del personal, cuando se requiera;
- ✓ Las superficies a partir de las cuales se realizará el examen;
- ✓ Técnica(s) (si es haz recto, haz angular, por contacto y/o si es por inmersión);
- ✓ Ángulo(s) y modo(s) de propagación de onda en el material;
- ✓ Tipo(s) de unidad de búsqueda, frecuencia(s) y tamaño(s)/forma(s) del elemento;
- ✓ Unidades especiales de búsqueda, cuñas o monturas, cuando se utilicen;
- ✓ Instrumento(s) ultrasónico(s);
- ✓ Calibración de bloque(s) de calibración y técnica(s);

- ✓ Direcciones y extensión del escaneo;
- ✓ Escaneo (si es manual o automático);
- ✓ Método para las indicaciones de tamaño;
- ✓ Adquisición de datos mejorada por computadora, cuando se usa; y
- ✓ Superposición de escaneo (disminución solamente).

En el procedimiento escrito se establecerá un valor único, o intervalo de valores (según sea el caso), para cada requerimiento.

2.1.2. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

Los criterios de aceptación y rechazo se encuentran incluidos en cada normativa, con el fin de proporcionar intervalos, clases, grados y niveles de calidad aceptables de los productos. Las normativas que contienen criterios de aceptación y rechazo presentan un método para la calificación de ciertos materiales; se consideran ciertas variables tales como la aleación, el proceso de fabricación, el acabado, el recubrimiento, el esfuerzo, la seguridad y la función, en el análisis de diseño antes de asignar una clase o grado del producto.

El criterio de aceptación y rechazo establece el tamaño y tipo de una discontinuidad aceptable en un área especificada. El producto podría llegar a ser dividido por zonas, para permitir diferentes niveles de calificación en diferentes posiciones sobre el producto, si se desea. Sin embargo, en muchos casos, el criterio de aceptación sólo tiene un tamaño de discontinuidad arriba del cual el defecto debe ser removido, debe ser removido y reparado, o la pieza debe ser desechada [4].

2.2. PROPUESTA DE LA PRÁCTICA ESTÁNDAR PARA MEDIR ESPESORES POR CONTACTO MANUAL UTILIZANDO EL MÉTODO PULSO-ECO (NORMA E797-15 DE LA ASTM)

Esta normativa tiene como base práctica la aplicación del método pulso-eco y se aplica para determinar espesores a materiales que estén en servicio y que no excedan temperaturas por arriba de 93 °C (200 °F) [5].

Esta práctica es aplicable a cualquier material en el que las ondas ultrasónicas se propaguen a una velocidad constante a lo largo de la pieza examinada. Las mediciones ultrasónicas de espesores se utilizan ampliamente en formas básicas, en piezas maquinadas con bastante precisión y para determinar el desgaste de paredes en equipos de procesos causados por corrosión y erosión [5].

Esta práctica está basada en la ecuación del espesor, medido por el pulso-eco, la cual es la Ec. 2.1, así:

$$t = \frac{V * T}{2} \quad (2.1)$$

donde: t , es el espesor,

V , es la velocidad del sonido, y

T , es el tiempo de tránsito (ida y vuelta).

El instrumento ultrasónico de pulso-eco mide el tiempo de tránsito del pulso ultrasónico a través de la pieza. La velocidad en el material que se examina es función de las propiedades físicas del material y generalmente se asume que es una constante para una clase dada de materiales [5].

Tener en cuenta que para un método de calibración se deberá tener el valor correcto de la velocidad ultrasónica a la que viaja en el material para que de esta manera se pueda obtener valores correctos de los espesores de los bloques de calibración. Si se conoce la velocidad del material, simplemente se ingresa el valor de velocidad directamente en el medidor. Se deberá tener

disponible un bloque con el espesor aproximado al máximo del objeto a examinar y un bloque con el espesor mínimo aproximado del objeto [5].

Si se desconoce la velocidad del material y no se puede tomar un espesor de muestra del material, se puede elegir un tipo de material de una lista almacenada en el medidor. Para cada material almacenado en la lista se tiene un valor de velocidad correspondiente. *Nota: Estas velocidades no siempre serán una representación exacta del material que se está probando. Utilizar estos valores sólo si una aproximación cercana es aceptable.*

El elemento de visualización (pantalla A-scan, medidor o pantalla digital) se debe ajustar correctamente para que se obtengan valores convenientes de espesor dependiendo del intervalo que se esté utilizando. El control de esta función puede tener diferentes nombres en diferentes instrumentos, incluyendo intervalo, barrido, material estandarizado o velocidad [5].

Los circuitos de temporización en diferentes instrumentos utilizan varios esquemas de conversión. Un método común es el denominado “conversión de hora/analógica” en la que el tiempo medido por el instrumento se convierte en un voltaje de CC proporcional que luego se aplica al dispositivo de lectura. La otra técnica utiliza un oscilador de alta frecuencia que es modulado o controlado por las indicaciones de eco apropiadas, la salida se usa directamente para lecturas digitales adecuadas o se convierte a un voltaje para otra presentación. Una relación del tiempo de tránsito (T) frente al espesor se presenta gráficamente en la Fig. 2.1.

Es importante enfatizar que las mediciones de espesores se realizan desde un lado del objeto, sin necesidad de acceder a la superficie opuesta del objeto examinado.

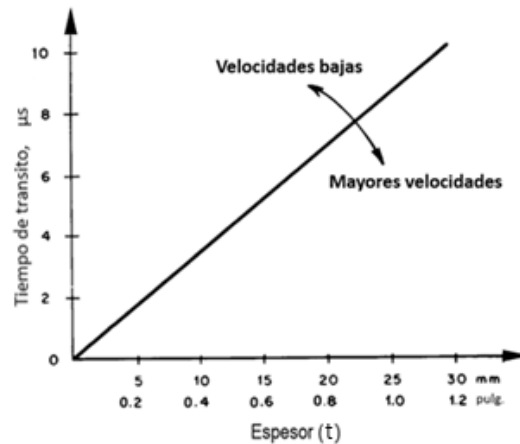


Fig. 2.1. Relación tiempo de tránsito/espesor.
 Nota: La pendiente de la línea de conversión de velocidad es aproximadamente la del acero.

Los siguientes elementos están sujetos a un acuerdo contractual entre las partes que utilizan o hacen referencia de esta práctica:

- 1) Cualificación del personal: este se debe especificar en el acuerdo contractual, el personal que realice exámenes de acuerdo con esta norma deberá estar calificado de acuerdo con una normativa nacional o internacional [5].

Entre las prácticas o normas de calificación del personal de END están:

- La norma CP-189 de la ANSI/ASNT,
- El documento SNT-TC-1A, y
- La norma 9712 de la ISO, o un documento que esté certificado por el empleador o agencia de certificación, según corresponda.

La práctica o norma utilizada y su revisión se identificarán en el acuerdo contractual entre las partes usuarias, así:

- 2) Las agencias de END deberán estar calificadas y debidamente evaluadas. Esto solamente si se especifica en el acuerdo contractual.
- 3) De igual forma los procedimientos y técnicas que se utilicen serán especificados en el acuerdo contractual.
- 4) Los criterios de preparación de la superficie previa al examen también deben especificarse en el acuerdo contractual.

Es importante aclarar que esta normativa reconoce que los instrumentos de medición de espesores se dividen en tres grupos [5]:

- A) Detectores de fallas con una lectura de pantalla A-scan,
- B) Detectores de fallas con pantalla A-scan y lectura directa de espesor, y
- C) Lectura directa de espesores:
 - a) Los detectores de fallas con lecturas de pantalla A-scan, presentan información de tiempo/amplitud. Para determinar el espesor se realiza leyendo la distancia entre el pulso inicial (corregido a cero) y el primer eco de retorno (reflexión posterior), o entre ecos de reflexión múltiple posterior (ver, Fig. 2.2), en una línea de base estandarizada de la pantalla A-scan. La línea base de la pantalla A-scan se debe ajustar para los incrementos de espesor deseados.

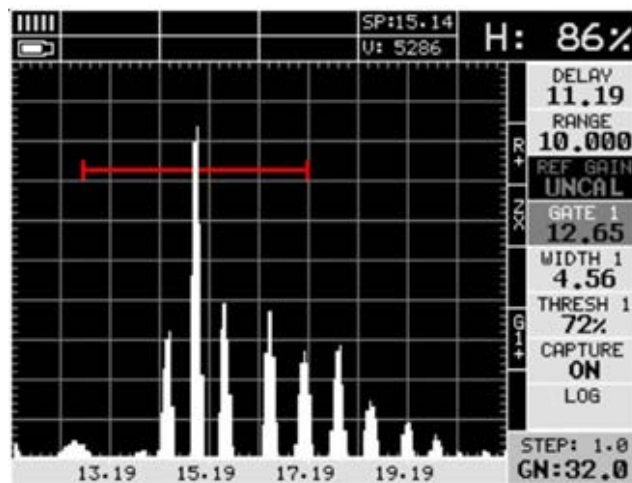


Fig. 2.2. Referencia para determinar el espesor del material inspeccionado.

- b) Los detectores de fallas con pantalla A-scan y lectura directa digital son instrumentos de detección de fallas ultrasónico de pulso combinado. La pantalla A-scan proporciona una verificación de discontinuidades internas o variaciones de la intensidad del eco y al mismo tiempo proporciona la lectura del espesor (ver, Fig. 2.3).

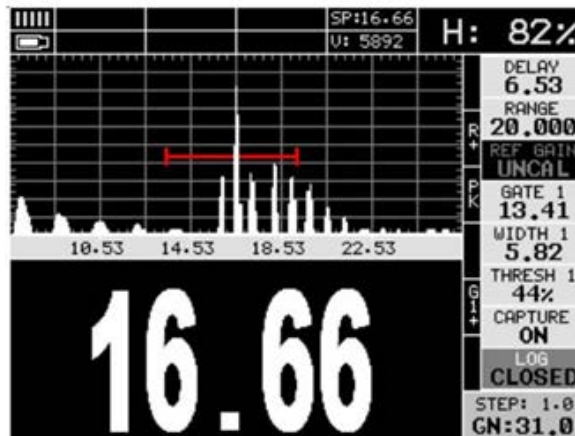


Fig. 2.3. Demostración de detector de pantalla A-scan y lectura de espesor.

- c) Los instrumentos de lectura digital están diseñados para medición de espesores y presentan lecturas numéricas directas de todo tipo de espesores.

La mayoría de unidades de búsqueda de tipo pulso-eco (contacto de haz recto, línea de retardo y elemento dual) son aplicables si se utilizan instrumentos detectores de fallas. Si un instrumento de lectura de espesor tiene la capacidad de leer secciones delgadas, generalmente se usa una unidad de búsqueda de alta frecuencia altamente amortiguada [5].

Las mediciones de materiales a altas temperaturas requieren unidades de búsqueda especialmente diseñadas para la aplicación. Cuando se utilizan unidades de búsqueda de elemento dual, su no linealidad inherente generalmente requiere correcciones especiales para secciones delgadas (ver, Fig. 2.4). Para obtener un rendimiento óptimo, a menudo es necesario que el instrumento y las unidades de búsqueda coincidan [5].

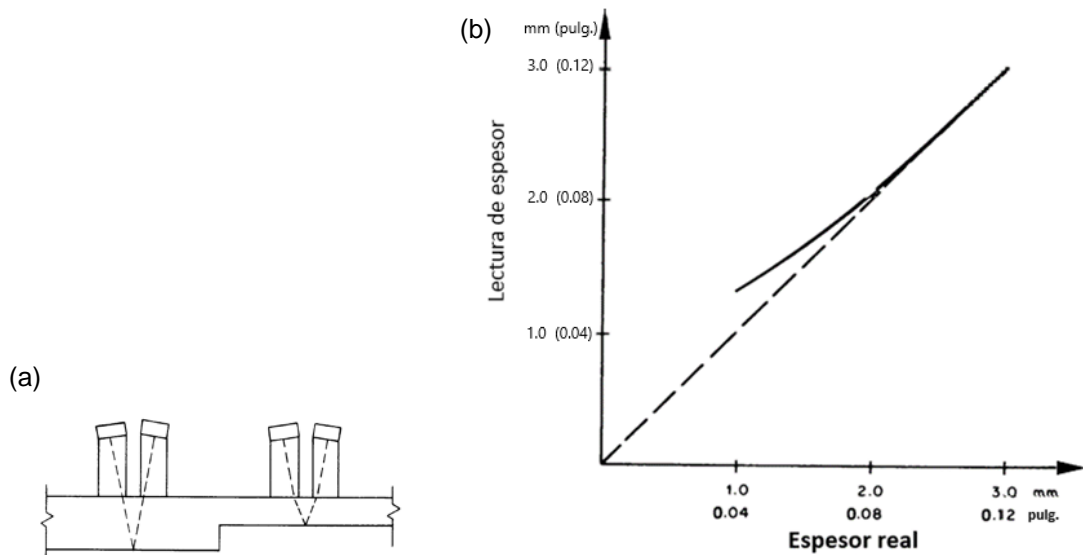


Fig. 2.4. No linealidad del transductor dual: (a) La trayectoria del sonido proporcional aumenta según disminuya el espesor; y (b) valores típicos de error de lectura.

Bajo esta normativa es fundamental la estandarización del aparato y se presentan 4 casos particulares para la calibración del equipo [5]:

Caso I.- Contacto directo, búsqueda de elemento único:

Condiciones: el inicio de la pantalla está sincronizado al pulso inicial. Todos los elementos de visualización son lineales. El grosor completo se presenta en la pantalla A-scan.

En estas condiciones, se puede suponer que la línea de conversión de velocidad pivota efectivamente sobre el origen (ver, Fig. 2.1). Puede ser necesario restar el tiempo de la placa de desgaste, que requiere un uso menor del control de retardo. Es recomendable que se utilicen bloques de calibración proporcionando un mínimo de dos espesores que abarquen el intervalo de espesores para verificar la precisión de la distancia completa.

Colocar la unidad de búsqueda en un bloque de referencia, de espesor conocido con un acoplador adecuado y ajustar los controles de instrumentos (a lo que se le llama estandarización de materiales, distancia, barrido o velocidad) hasta que la pantalla presente la lectura de espesor.

Las lecturas deben ser verificadas y ajustadas en bloques de calibración con un espesor de menor valor para mejorar la precisión general del sistema [5].

Caso II.- Unidad de búsqueda de elemento único de línea de retardo:

Cuando se utiliza esta unidad de búsqueda, es necesario que el equipo sea capaz de corregir el tiempo durante el cual el sonido pasa por la línea de retardo para que el final del mismo se haga coincidir con espesor cero. Esto requiere un llamado control de "retraso" en el instrumento o detección electrónica automática de espesor cero. *Nota: la línea de retardo es una pieza pequeña incorporada en los transductores de elemento sencillo y sirve para disminuir la velocidad del pulso sonoro, esto permite una medición de alta precisión en materiales delgados.*

En la mayoría de los instrumentos, si el circuito de estandarización del material se ajustó previamente para una velocidad de material dada, el control de retardo se debe ajustar hasta que se obtenga una lectura de espesor correcta en el instrumento. Sin embargo, si el instrumento debe estar completamente estandarizado con la unidad de búsqueda de línea de retardo, se recomienda la técnica siguiente [5]:

- 1) Utilizar al menos dos bloques de calibración. Uno debe tener un espesor cercano al máximo de distancia a medir y el otro bloque cerca del espesor mínimo.
- 2) Colocar la unidad de búsqueda secuencialmente en un bloque y luego el otro (obtener ambas lecturas). Se debe calcular la diferencia entre estas dos lecturas. Si la diferencia de espesor de lectura es menor que la diferencia de espesor real, colocar la unidad de búsqueda en la muestra más gruesa y ajustar el control de estandarización del material para expandir el intervalo de espesor. Si la diferencia de espesor de lectura es mayor que la diferencia de espesor real, colocar la unidad de búsqueda en la muestra más gruesa y ajustar el control de estandarización del material para disminuir el intervalo de espesor. Volver a colocar la unidad de búsqueda secuencialmente en ambos bloques y observar las diferencias de lectura mientras se realizan las

correcciones adicionales apropiadas. Cuando el diferencial de espesor de lectura es igual al diferencial de espesor real, quiere decir que la distancia de espesor del material está ajustada correctamente. Un sólo ajuste del control de retardo debería permitir lecturas correctas tanto en el extremo superior como en el inferior de la distancia de espesor.

- 3) Una técnica alternativa para las unidades de búsqueda de línea de retardo es una variación de la descrita en (2) Se realizan una serie de ajustes secuenciales, utilizando el control de "retraso" para proporcionar lecturas correctas en el bloque de referencia más delgado y el control de "distancia" para corregir las lecturas en el bloque más grueso. A veces es útil una corrección excesiva moderada. Cuando ambas lecturas son "correctas", el instrumento está ajustado correctamente.

Caso III.- Unidades de búsqueda dual:

El método descrito en el Caso II también es adecuado para equipos que utilizan unidades de búsqueda dual en los intervalos por encima de 3 mm (0.125 pulg). Sin embargo, por debajo de esos valores se tiene un error inherente debido a la trayectoria en V que recorre el haz del sonido. El tiempo de tránsito ya no es linealmente proporcional al espesor, y la condición se deteriora hacia el extremo inferior del intervalo de espesor. La variación también se presenta esquemáticamente en la Fig. 2.4a. Los valores de error típicos se presentan en la Fig. 2.4b.

Si las mediciones se van a realizar en un número muy limitado cerca del extremo delgado de la escala, es posible estandarizar el instrumento con la técnica del Caso II usando bloques de calibración delgados apropiados. Esto producirá una curva de corrección que es aproximadamente correcta en ese intervalo limitado. Teniendo en consideración que habrá un error sustancial en medidas más gruesas [5].

Si se va a medir un amplio intervalo de espesores, puede ser más adecuado estandarizar como en el Caso II utilizando bloques de calibración en el extremo superior del intervalo y tal vez a la mitad del extremo inferior.

Después de esto, se pueden establecer correcciones empíricas para el extremo más delgado del intervalo.

Para una pantalla de medidor tipo panel de lectura directa, es conveniente incorporar estas correcciones en la pantalla como una función no lineal [5].

Caso IV.- Secciones gruesas:

- 1) En este caso se requiere de mucha precisión en secciones que son bastante gruesas, se utiliza unidad de búsqueda de contacto directo y sincronización de pulso inicial. El inicio de la pantalla se retrasa como se describe en numeral 3, caso IV. Todos los elementos de visualización deben ser lineales y el grosor incremental se presenta en la pantalla A-scan.
- 2) La estandarización básica del barrido se realizará como se describe en el Caso I. El bloque de referencia elegido debe tener un espesor que permita estandarizar la distancia de barrido completo con la precisión adecuada, es decir, alrededor de 10 a 25 mm (0.4 a 1 pulg) escala completa.
- 3) Después de la estandarización básica, el barrido se debe retrasar. Por ejemplo, si se espera que el espesor nominal de la pieza sea de 50 a 60 mm (2 a 2.4 pulg), y el bloque de calibración básico es de 10 mm (0.4 pulg), y el espesor incremental presentado también será de 50 a 60 mm (2.0 a 2.4 pulg), se requieren los siguientes pasos [5].
 - Ajuste el control de retardo para que el quinto eco posterior del bloque de calibración básico equivalente a 50 mm (2 pulg), esté alineado con la referencia 0 en la pantalla A-scan.
 - El sexto eco de retorno debería ocurrir en el borde derecho del barrido estandarizado.
- 4) Esta normalización se puede comprobar sobre un bloque conocido del espesor total aproximado.

2.2.1. RIESGOS TÉCNICOS QUE SE PUEDEN PRESENTAR

Las unidades de búsqueda duales se pueden usar de manera efectiva en condiciones de superficie irregular. En este caso, sólo se utiliza en la medición el primer eco devuelto. Generalmente, se realiza una búsqueda de exploración localizada para detectar la mínima pared restante. No obstante, se consideran los riesgos siguientes [5]:

A) Riesgos en las propiedades del material:

Se hace la recomendación de que el instrumento debe estar estandarizado en un material que tenga la misma velocidad acústica y atenuación que el material que se va a inspeccionar. Siempre que sea posible, la estandarización se debe confirmar mediante la medición dimensional directa del material a examinar.

B) Riesgos en el escaneo:

La velocidad máxima de escaneo se debe indicar en el procedimiento. Las condiciones materiales, el tipo de equipo y las capacidades del operador pueden requerir un escaneo más lento.

C) Riesgos en la geometría:

a) La mayor precisión siempre se consigue en materiales con superficies paralelas o concéntricas. En muchos casos, es posible obtener medidas de materiales con superficies no paralelas pero la precisión de la lectura puede ser limitada y la lectura es generalmente la de la porción más delgada de la sección que está siendo inspeccionada por el haz de sonido en ese instante dado.

b) Las curvas de diámetro relativamente pequeño a menudo requieren técnicas y equipos especiales. Cuando se quiera medir diámetros pequeños, es posible que se necesiten procedimientos especiales que incluyan especímenes adicionales para garantizar la precisión de la configuración y la lectura.

D) Riesgos en tren de ondas de reflexión trasera:

Para poder examinar materiales que tengan alta temperatura, hasta ~540 °C (1,000 °F), se pueden medir con unidades de búsqueda y acopladores especialmente diseñados. Una regla empírica que se usa a menudo es la siguiente: la lectura del espesor aparente obtenida de paredes de acero que tienen temperaturas elevadas es demasiado gruesa por lo que se reducirá en un factor aproximado de 1% por cada 55 °C (100 °F) de temperatura. Por ejemplo, si el instrumento se estandarizó en una pieza de material similar a 20 °C (68 °F), y si la lectura se obtuvo con una temperatura superficial de 460 °C (860 °F), la lectura aparente se debe reducir en 8%. Esta corrección es promedio para muchos tipos de acero. Otras correcciones se tendrían que determinar empíricamente para otros materiales.

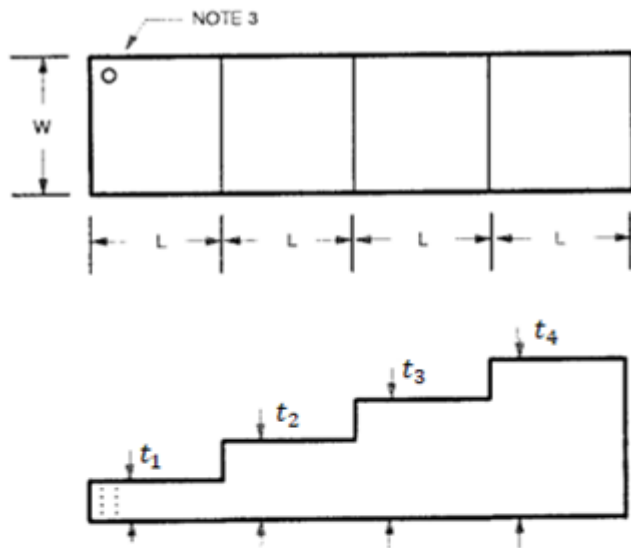
E) Riesgos en las lecturas:

Se recomiendan las pantallas A-scan cuando las superficies reflectantes sean ásperas, estén picadas o en su mínima instancia que solamente estén corroídas. La lectura directa de espesores, sin una pantalla A-scan, presenta riesgos de desajuste del equipo y lecturas incorrectas especialmente en secciones delgadas, superficies rugosas, corroídas e intervalos de espesores que cambian rápidamente.

F) Riesgos en los estándares de referencia:

Las variaciones en la intensidad de la señal de eco pueden producir un error equivalente a uno o más semiciclos de la frecuencia de RF, según las características de la instrumentación.

En las Figs. 2.5 y 2.6 se presentan patrones escalonados de múltiples pasos (espesores) en vista de planta y vista lateral, los cuales son muy útiles para los procedimientos de calibración de los equipos de medición [5].



NOT TO SCALE

TABLA DE DIMENSIONES

Leyenda	U.S. Bloque tradicional, pulg.		Bloque métrico 4A, mm.		Bloque métrico 4B, mm.	
	Dimensión	Tolerancia	Dimensión	Tolerancia	Dimensión	Tolerancia
t_1	0.250	0.001	6.25	0.02	5.00	0.02
t_2	0.500	0.001	12.50	0.02	10.00	0.02
t_3	0.750	0.001	18.75	0.02	15.00	0.02
t_4	1.000	0.001	25.00	0.02	20.00	0.02
L	0.75	0.02	20.0	0.5	20.0	0.5
W	0.75	0.05	20.0	1.0	20.0	1.0

Fig. 2.5. Bloque de calibración, espesor típico de cuatro pasos.

Notas:

- 1) El material debe ser el especificado
- 2) Acabado superficial: caras en " t " R_a 0.8 μm (32 μpulg) máx.
- 3) Ubicación para el orificio pasante opcional 1.5 mm (1/16 pulg) de diámetro utilizado para soporte de bloque durante el enchapado: centro a 1.5 mm (8 pulg) del bloque bordes.
- 4) Las dimensiones " t " deben ser posterior al enchapado o anodizado requerido.
- 5) Para evitar bordes afilados, minimice la acumulación de placas o elimine muescas y fresas en servicio los bordes de los bloques se pueden suavizar biselando, siempre que el tratamiento de las esquinas no reduzca la dimensión del borde en más de 0.5 mm (0.020 pulg).

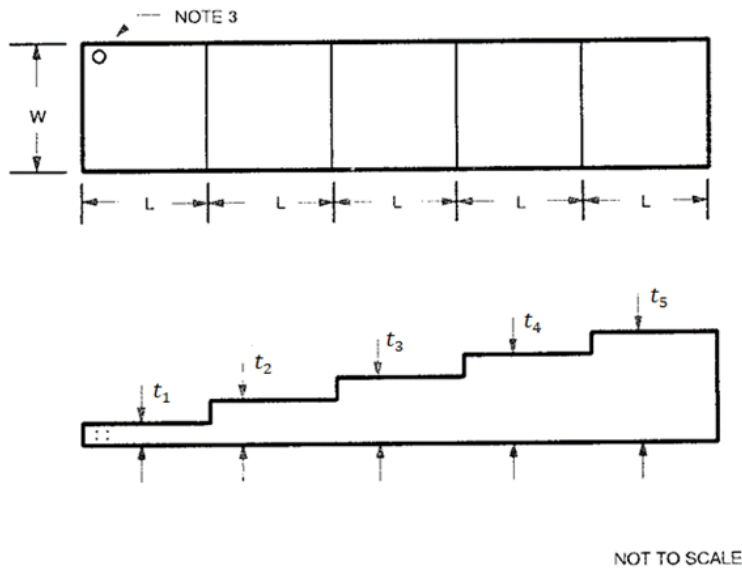


TABLA DE DIMENSIONES

Legend	Block Habitual U.S., pulg.		Block métrico 5A mm.		Bloque métrico 5B, mm.	
	Dimension	Tolerance	Dimension	Tolerance	Dimension	Tolerance
t_1	0.100	0.001	2.50	0.02	2.00	0.02
t_2	0.200	0.001	5.00	0.02	4.00	0.02
t_3	0.300	0.001	7.50	0.02	6.00	0.02
t_4	0.400	0.001	10.00	0.02	8.00	0.02
t_5	0.500	0.001	12.50	0.02	10.00	0.02
L	0.75	0.02	20.0	0.5	20.00	0.5
W	0.75	0.05	20.0	1.0	20.00	1.0

Fig. 2.6. Bloque de calibración tipo escalera de cinco pasos.

Notas:

- 1) El material debe ser el especificado
- 2) Acabado superficial: caras en "R" R_a 0.8 μ m (32 μ pulg) máx.
- 3) Ubicación para el orificio pasante opcional 1.5 mm (1/16 pulg) de diámetro utilizado para soporte de bloque durante el enchapado: centro a 1.5 mm (8 pulg) del bloque bordes.
- 4) Las dimensiones "t" deben ser posterior al enchapado o anodizado requerido.
- 5) Para evitar bordes afilados, minimice la acumulación de placas o elimine muescas y fresas en servicio los bordes de los bloques se pueden suavizar biselando, siempre que el tratamiento de las esquinas no reduzca la dimensión del borde en más de 0.5 mm (0.020 pulg).

2.3. PROPUESTA DEL CÓDIGO D1.1 DE LA AWS, APLICADO A LA INSPECCIÓN DE SOLDADURAS

La sección 8 parte F del código D1.1 hace referencia a pruebas de inspección de soldaduras aplicando ensayos no destructivos (END) por medio de ultrasonido, es aplicable en soldaduras a tope siempre que los espesores estén entre 8 y 200 mm (5/16 y 8 pulg) [6].

Se ha tomado a bien considerar el estudio de este código ya que los métodos de ensayo cumplen con los estándares internacionales, además de ser fáciles de aplicar. Muchas instituciones públicas y privadas a nivel mundial lo toman como regla general y base fundamental de otros ensayos no destructivos, no solamente para ensayos por ultrasonido.

2.3.1. LA CALIFICACIÓN DEL PERSONAL

Para poder aplicar este código a la inspección de ensayos por ultrasonido deberá por lo menos estar calificado según la edición actual de la práctica SNT-TC-1A de la Sociedad Estadounidense de Ensayos No Destructivos (ASNT). Las personas que realicen estos ensayos deben estar calificadas para [6]:

- A) Realizar ensayos por ultrasonido Nivel II, o
- B) Ensayos Nivel I trabajando con ensayos Nivel II.

Así la certificación de individuos Nivel I y Nivel II la debe llevar a cabo una persona que sea Nivel III que haya:

- A) Sido certificada por la ASNT, o
- B) Recibido la educación, la capacitación, la experiencia y aprobado con éxito el examen escrito descrito en SNT-TC-1A.

Además, existen requisitos que deben cumplir los equipos que se destinen para estos ensayos, los cuales son los siguientes:

- A) El instrumento de ultrasonido debe ser de tipo pulso-eco adecuado para utilizar con transductores que oscilen a frecuencias entre 1 y 6 MHz.
- B) La pantalla debe ser de registro de video rectificado con representación de tipo "A".

La Tabla 2.1 sirve como una guía didáctica, para la calificación de instrumentos como para la calibración de equipo y unidades de búsqueda tanto para haz recto como haz angular, además de proporcionar la frecuencia de uso con que se deben realizar [6].

Tabla 2.1. Requisitos de calificación y calibración de equipos.

		Tipo de calificación o actividad de calibración		Frecuencia mínima	
		Descripción	Sección del código	Frecuencia mínima	Sección del código
Procedimientos para la calificación de equipos	Instrumentos	Linealidad horizontal	8.28.1	2 meses	8.23.1
		Control de ganancia/precisión de dB	8.28.2	2 meses	8.23.2
		Reflexiones internas	8.28.3	40 horas de uso ¹	8.23.3
	Unidades de búsqueda	Unidades de búsqueda de ángulo de haz (Punto indicador, ángulo)	8.27.2.1 8.27.2.2	8 horas de uso ¹	8.23.4
		Combinaciones de instrumentos/unidades de búsqueda	Resolución (ángulo de haz)	8.22.3 8.27.2.5	Antes del uso inicial ²
	Resolución (haz recto)		8.27.1.3	Antes del uso inicial ²	8.22.3
Calibración para ensayos	Haz recto (para ensayo de material base)	Rango	8.24.4.1 o 8.27.1.1	Justo antes y en la ubicación de la primera soldadura probada ³	8.24.2
		Sensibilidad	8.24.4.2 o 8.27.1.2		
	Ángulo de haces	Rango	8.24.5.1 8.27.2.3		
		Sensibilidad	8.24.5.2 8.27.2.4		
		Punto indicador	8.27.2.1		
		Ángulo	8.27.2.2		
	Haz recto y ángulo de haz	Recalibración	8.24.3		

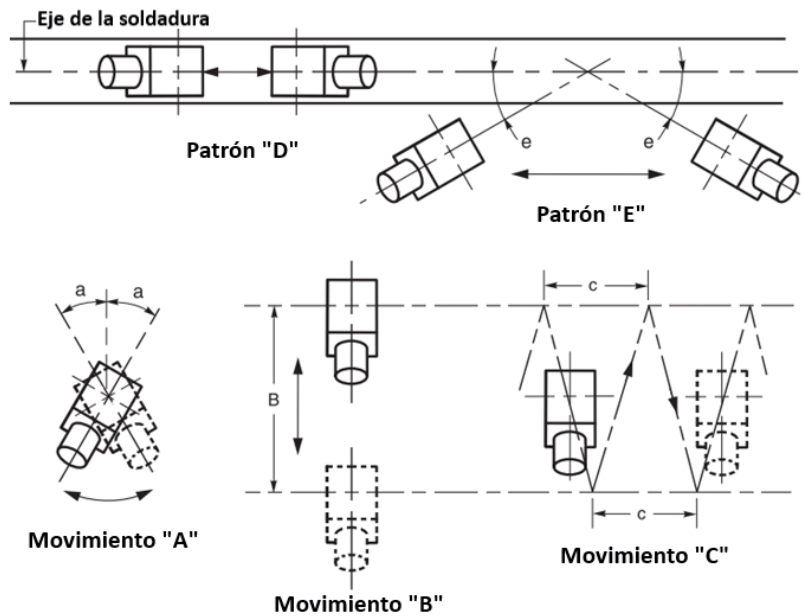
¹: Se debe llevar a cabo para cada unidad de búsqueda.
²: Se debe llevar a cabo para cada combinación de unidad de búsqueda (transductor y zapata) e instrumentos antes del uso inicial.
³: Después de cumplir con los requisitos de 8.24.2, se deben aplicar los requisitos de recalibración de 8.24.3.
⁴: Cuando se ha perturbado el circuito eléctrico de cualquier modo que incluye lo siguiente:
 1) Cambio de transductor
 2) Cambio de batería
 3) Cambio de salida eléctrica
 4) Cambio de cable coaxial
 5) Corte de energía (falla)

2.3.2. PROCESO

Antes de realizar el debido proceso se deben tener en consideración factores que son imprescindibles para la realización del ensayo, estos son los siguientes [6]:

A) La limpieza. A todas las superficies sometidas a inspección deben estar libres de salpicaduras de soldadura, suciedad, grasa, aceite (distinto del utilizado como acoplante), pintura, escamas (metálicas) sueltas, la superficie debe tener un contorno que permita el acoplamiento directo.

- B) Acoplante. El acoplante debe ser una mezcla de glicerina o de resina de celulosa y agua para lograr la consistencia adecuada. Se puede agregar un agente humectante si fuera necesario. Es posible utilizar aceite liviano de máquinas como acoplante en bloques de calibración.
- C) Ensayos en soldaduras: para realizar el ensayo se deben tomar muy en consideración las clasificaciones como las siguientes:
- a) Todas las juntas a tope deben ser probadas en cada lado del eje de la soldadura, se deben aplicar los patrones de escaneo que se presentan en la Fig. 2.7 según sea necesario, para detectar discontinuidades longitudinales y transversales. La intención es que, como mínimo, todas las soldaduras sean probadas pasando sonido a través del volumen total de la soldadura y el haz en dos direcciones de cruce, siempre que sea posible.



Notas:

- 1) Los patrones de ensayo son todos simétricos alrededor del eje de soldadura con la excepción del patrón D, que debe ser conducido directamente sobre el eje de la soldadura.
- 2) Se deben realizar ensayos de ambos lados del eje de la soldadura siempre que sea mecánicamente posible.

Fig. 2.7. Vista en planta de los patrones de escaneo de ultrasonido.

Los patrones de escaneo de la Fig. 2.7 tienen su propia aplicación siempre y cuando las discontinuidades sean longitudinales se deberá cumplir con 3 tipos de movimiento (ver, Tabla 2.2):

Para soldaduras que cuenten con discontinuidades transversales, el patrón de escaneo “D” (ver, Fig. 2.7) debe ser utilizado cuando las soldaduras estén debidamente esmeriladas al ras. Y el patrón de escaneo “E” (ver, Fig. 2.7) se deberá utilizar cuando el refuerzo de la soldadura no esté esmerilado al ras y el ángulo de escaneo “e” debe ser de 15° como máximo. *Nota: El patrón de escaneo debe cubrir toda la sección de soldadura [6].*

Tabla 2.2. Tipos de movimientos del transductor.

Movimiento de escaneo	Descripción.
A	El ángulo de rotación “a” será de 10°.
B	Esta será estimada por el personal a tal grado que la soldadura que sea evaluada quede completamente cubierta.
C	La distancia de progresión c debe ser aproximadamente la mitad del ancho del transductor.

Nota: Los movimientos A, B y C se pueden combinar en un sólo patrón de escaneo para obtener un barrido completo.

- b) Indicación máxima. Esta es la lectura máxima del instrumento en decibeles y será utilizada como “Nivel de indicación, **a**,” para calcular la “Clasificación de indicación, **d**,”
- c) Factor de atenuación. Para determinar el “factor de atenuación, **c**,” se deberá realizar un cálculo matemático el cual consiste en restar 25 mm (1 pulg) de la distancia de la trayectoria del sonido y multiplicando el resto por 0.08 para unidades del SI (o por 2 para unidades del sistema ingles).
El factor (**c**) se redondeará al lugar decimal significativo más cercano (0.1). Los valores inferiores a 0.05 se reducirán al 0.1 más bajo y los de 0.05 o más se incrementarán al 0.1 más alto.
- d) Clasificación de indicación. La “Clasificación de indicación, **d**,” en el Informe de ultrasonido, representa la diferencia algebraica en decibeles entre el nivel de indicación y el nivel de referencia con corrección para la atenuación conforme se indica en las expresiones siguientes:
 - Instrumentos con ganancia en dB: $d = a - b - c$

- Instrumentos con atenuación en dB: $d = b - a - c$

Para evitar complicaciones los valores de “d” no llevará decimales, si pasa de 0.5 se aproximará al entero mayor y si es menor a 0.5 se aproximará al entero menor.

D) La Base para la aceptación o rechazo de una discontinuidad se deberá seguir lo estipulado en Tabla 2.3 para estructuras cargadas estáticamente o la Tabla 2.5 para estructuras cargadas cíclicamente, según sea el caso.

Tabla 2.3. Criterios de aceptación-rechazo con ultrasonido (conexiones no tubulares cargadas estáticamente y conexiones no tubulares cargadas cíclicamente en compresión).

Clase de severidad de discontinuidad	Tamaño de la soldadura* en mm (pulg) y ángulo de unidad de búsqueda												
	8 a 20 (5/16 a 3/4)		> 20 a 38 (3/4 a 1-1/2)		> 38 a 65 (1-1/2 a 2-1/2)			> 65 a 100 (2-1/2 a 4)			> 100 a 200 (4 hasta 8)		
	70°	60°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°		
Clase A	+5 y menor	+2 y menor	-2 y menor	+1 y menor	+3 y menor	-5 y menor	-2 y menor	+0 y menor	-7 y menor	-4 y menor	-1 y menor		
Clase B	+6	+3	-1 0	+2 +3	+4 +5	-4 -3	-1 0	+1 +2	-6 -5	-3 -2	0 +1		
Clase C	+7	+4	+1 +2	+4 +5	+6 +7	-2 a +2	+1 +2	+3 +4	-4 a +2	-1 a +2	+2 +3		
Clase D	+8 y mayor	+5 y mayor	+3 y mayor	+6 y mayor	+8 y mayor	+3 y mayor	+3 y mayor	+5 y mayor	+3 y mayor	+3 y mayor	+4 y mayor		

*: El tamaño de la soldadura en juntas a tope debe ser el espesor nominal de la pieza más delgada de las que se deben unir.

Notas:

- 1) Las discontinuidades Clase B y C deberán estar separadas por al menos 2L, siendo L la longitud de la discontinuidad más larga, excepto cuando dos o más de dichas discontinuidades no estén separadas por al menos 2L, pero la longitud combinada de las discontinuidades y su distancia de separación sea igual o inferior a la longitud máxima admisible de acuerdo con las disposiciones de la Clase B o C, en cuyo caso la discontinuidad deberá ser considerada una sola discontinuidad aceptable.
- 2) Las discontinuidades Clase B y C no deberán comenzar a una distancia inferior a 2L de los extremos de la soldadura que conducen el esfuerzo de tracción primario, siendo L la longitud de discontinuidad.

Clase A (discontinuidades grandes): Se deberá rechazar cualquier indicación en esta categoría (independientemente de la longitud).

Clase B (discontinuidades medianas): Toda indicación en esta categoría con una longitud superior a 20 mm (3/4 pulg) deberá ser rechazada.

Clase C (discontinuidades pequeñas): Se deberá rechazar toda indicación en esta categoría con una longitud superior a 50 mm (2 pulg)

Clase D (discontinuidades menores): Se deberá aceptar toda indicación en esta categoría, independientemente de la longitud o ubicación de la soldadura.

Tabla 2.4. Niveles de escaneo (conexiones no tubulares cargadas estáticamente).

Trayectoria del sonido *	Referencia superior a cero, dB
a 65 mm (2 1/2 pulg)	14
> 65 a 125 mm (2 1/2 a 5 pulg)	19
> 125 a 250 mm (5 a 10 pulg)	29
> 250 hasta 380 mm (10 – 15 pulg)	39

* Esta columna se refiere a la distancia de la trayectoria del sonido; NO al espesor del material.

Tabla 2.5. Criterios de aceptación-rechazo con ultrasonido (conexiones no tubulares cargadas cíclicamente a tracción).

Clase de severidad de discontinuidad	Tamaño de la soldadura* en mm (pulg) y ángulo de unidad de búsqueda										
	8 a 20 (5/16 a 3/4)	> 20 a 38 (3/4 a 1-1/2)	> 38 a 65 (1-1/2 a 2-1/2)			> 65 a 100 (2-1/2 a 4)			> 100 a 200 (4 hasta 8)		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
Clase A	+10 y menor	+8 y menor	+4 y menor	+7 y menor	+9 y menor	+1 y menor	+4 y menor	+6 y menor	-2 y menor	+1 y menor	+3 y menor
Clase B	+11	+9	+5 +6	+8 +9	+10 +11	+2 +3	+5 +6	+7 +8	-1 0	+2 +3	+4 +5
Clase C	+12	+10	+7 +8	+10 +11	+12 +13	+4 +5	+7 +8	+9 +10	+1 +2	+4 +5	+6 +7
Clase D	+13 y mayor	+11 y mayor	+9 y mayor	+12 y mayor	+14 y mayor	+6 y mayor	+9 y mayor	+11 y mayor	+3 y mayor	+6 y mayor	+8 y mayor

*: El tamaño de la soldadura en juntas a tope debe ser el espesor nominal de la pieza más delgada de las que se deben unir.

Notas:

- 1) Las discontinuidades Clase B y C deberán estar separadas por al menos 2L, siendo L la longitud de la discontinuidad más larga, excepto cuando dos o más de dichas discontinuidades no estén separadas por al menos 2L, pero la longitud combinada de las discontinuidades y su distancia de separación sea igual o inferior a la longitud máxima admisible de acuerdo con las disposiciones de la Clase B o C, en cuyo caso la discontinuidad deberá ser considerada una sola discontinuidad aceptable.
- 2) Las discontinuidades Clase B y C no deberán comenzar a una distancia inferior a 2L de los extremos de la soldadura que conducen el esfuerzo de tracción primario, siendo L la longitud de discontinuidad.

Clase A (discontinuidades grandes): Se deberá rechazar cualquier indicación en esta categoría (independientemente de la longitud).

Clase B (discontinuidades medianas): Toda indicación en esta categoría con una longitud superior a 20 mm (3/4 pulg) deberá ser rechazada.

Clase C (discontinuidades pequeñas): Se deberá rechazar toda indicación en esta categoría con una longitud superior a 50 mm (2 pulg)

Clase D (discontinuidades menores): Se deberá aceptar toda indicación en esta categoría, independientemente de la longitud o ubicación de la soldadura.

Tabla 2.6. Niveles de escaneo (conexiones no tubulares cargadas cíclicamente a tracción).

Trayectoria del sonido*	Referencia superior a cero, dB
A 65 mm (2 1/2 pulg)	20
> 65 a 125 mm (2 1/2 a 5 pulg)	25
> 125 a 250 mm (5 a 10 pulg)	35
> 250 hasta 380 mm (10 a 15 pulg)	45

*Esta columna se refiere a la distancia de la trayectoria del sonido; NO al espesor del material.

Las Tablas 2.4 y 2.6 son utilizadas para ajustar el nivel de referencia en el equipo ajustable en decibelios, tomando en cuenta que la trayectoria del sonido (trayectoria en V) se obtiene mediante la Ec. 2.2 trigonométrica.

$$\text{Trayectoria del sonido} = 2 * t / \cos \theta \quad (2.2)$$

- E) Identificación del área rechazada. Cada discontinuidad inaceptable debe ser indicada en la soldadura por medio de una marca directamente sobre la discontinuidad en toda su longitud. La profundidad desde la superficie y la clasificación de la indicación deben ser anotadas sobre el metal base adyacente.
- F) Reparación: Las soldaduras consideradas inaceptables por ultrasonido deben ser reparadas con métodos como mecanizado, esmerilado, descascarillado o perforado. Las áreas reparadas se deben volver a ensayar por medio de ultrasonido con resultados tabulados con los de la prueba inicial para futura comparación [6].

2.3.3. CALIBRACIÓN DE LA UNIDAD ULTRASÓNICA CON BLOQUES TIPO IIW

En la Fig. 2.8 se presenta un bloque de referencia tipo IIW para la calibración de la distancia y de la sensibilidad del transductor.

Se debe tomar en consideración que para que exista una inspección con valores correctos es necesario una adecuada y correcta calibración de unidades de búsqueda de haz recto y de haz angular, así como del instrumento, a continuación, se detalla las posiciones dependiendo la función que deba desempeñar el equipo como tal teniendo en cuenta que cada instrumento ultrasónico tiene su propio procedimiento de calibración.

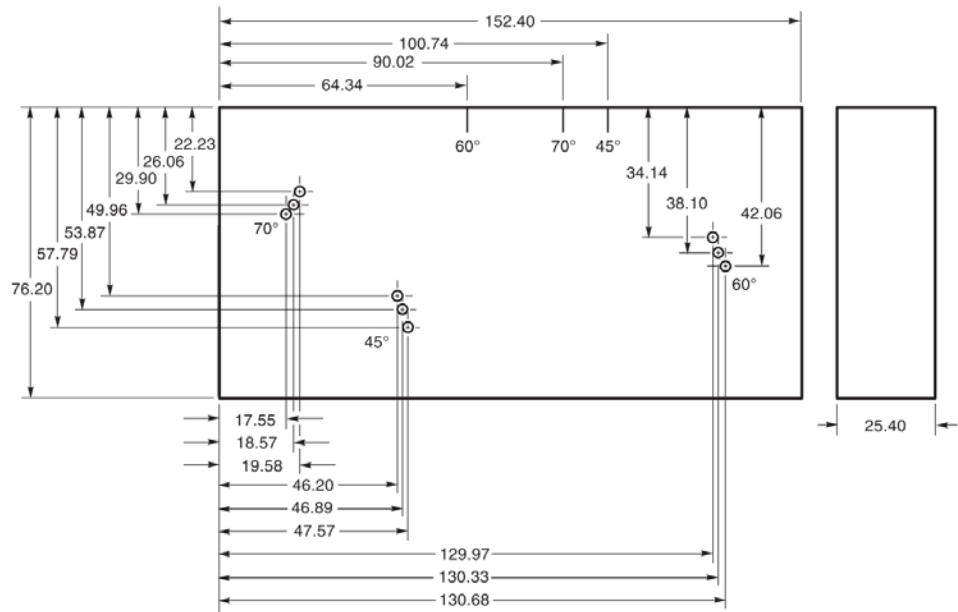
A) Modo longitudinal:

- a) Calibración de distancia: El transductor debe estar en posición G (vea, Fig. 2.9) en el bloque tipo IIW (ver, Fig. 2.8). El instrumento debe estar debidamente ajustado para producir indicaciones en 25 mm (1 pulg), 50 mm (2 pulg), 75 mm (3 pulg), 100 mm (4 pulg), etc. en la pantalla del equipo.
- b) Amplitud: El transductor debe estar en posición G (ver, Fig. 2.9) en el bloque tipo IIW. La ganancia se debe ajustar hasta que la indicación

- c) Resolución: El transductor debe estar en posición F (ver, Fig. 2.9). El transductor y el instrumento deben resolver las tres distancias.
- B) Modo de onda transversal (o de cizallamiento):
- a) Punto indicador: El punto de entrada de sonido del transductor (punto indicador) debe ser ubicado o verificado por el siguiente procedimiento:
- El transductor debe estar en posición D (ver, Fig. 2.9)
 - El transductor se debe mover hasta que la señal desde el radio esté maximizada. El punto en el transductor que se alinea con la línea del radio en el bloque de calibración es el punto de entrada de sonido
- b) Ángulo. El ángulo de la trayectoria de sonido del transductor debe ser verificado y determinado por uno de los siguientes procedimientos:
- El transductor debe estar ajustado en la posición B (ver, Fig. 2.9) en el bloque tipo IIW para ángulos entre 40 a 60° o en la posición C (ver, Fig. 2.9) en el bloque tipo IIW para ángulos entre 60 a 70°.
 - Para el ángulo seleccionado, el transductor se debe mover hacia adelante y hacia atrás sobre la línea indicativa del ángulo del transductor hasta que se maximice la señal desde el radio. El punto de entrada de sonido en el transductor se debe comparar con la marca del ángulo en el bloque de calibración y debe tener una tolerancia de $\pm 2^\circ$.
- c) Procedimiento de calibración de distancia. El transductor debe estar en posición D (ver, Fig. 2.9) (para cualquier ángulo). Luego se debe ajustar el instrumento para alcanzar una indicación en 100 mm (4 pulg) y una segunda indicación en 200 mm (8 pulg) o 225 mm (9 pulg).
- d) Procedimiento de calibración de la sensibilidad. El transductor debe estar en posición A (ver, Fig. 2.9) (para cualquier ángulo). Luego se debe ajustar la señal maximizada desde el orificio de 1.59 mm (0.060 pulg) para lograr una línea de referencia horizontal de indicación de altura. La máxima lectura de decibeles obtenida se debe utilizar como la lectura del "Nivel de referencia, **b**".

e) Calibración de resolución: para esta calibración se deben seguir los siguientes pasos:

- El transductor se debe ajustar en el bloque de referencia RC (ver, Fig. 2.10), posición Q (ver, Fig. 2.11) para un ángulo de 70° , posición R (ver, Fig. 2.11) para un ángulo de 60° o posición S (ver, Fig. 2.11) para un ángulo de 45° .



Nota: Todos los orificios tienen 1,59 mm de diámetro.

Fig. 2.10. Bloque de referencia para la resolución - RC (dimensiones en mm).

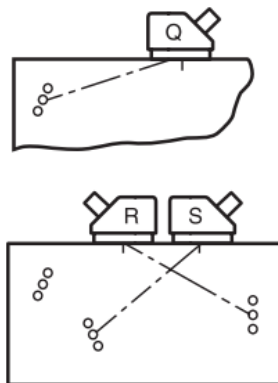


Fig. 2.11. Demostración de las posiciones del transductor para la calibración por resolución.

- El transductor y el instrumento deben resolver los tres orificios de ensayo, como mínimo al punto de distinguir los picos de las indicaciones de los tres orificios.

C) Distancia de aproximación de la unidad de búsqueda:

La distancia mínima admisible entre el pie de la unidad de búsqueda y el borde del bloque tipo IIW (ver, Fig. 2.12) debe cumplir con lo estipulado a continuación:

- Para transductor de 70° , $X = 50 \text{ mm}$ (2 pulg.),
- Para transductor de 60° , $X = 37 \text{ mm}$ (1 7/16 pulg.), y
- Para transductor de 45° , $X = 25 \text{ mm}$ (1 pulg.).

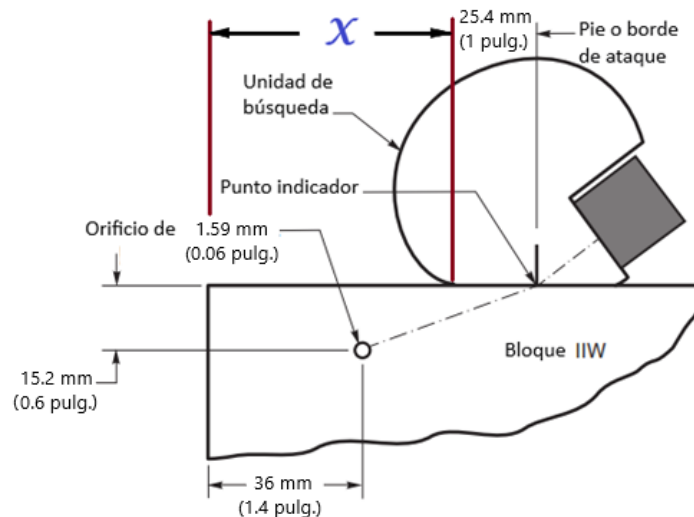


Fig. 2.12. Procedimiento para determinar la distancia de aproximación de la unidad de búsqueda utilizando el bloque de referencia IIW.

Para realizar la correcta inspección de un determinado cordón de soldadura, el técnico en ultrasonido debe tener conocimientos que ayuden a realizar un examen ultrasónico. Aquí se definen algunos aspectos básicos que influyen en el control ultrasónico [6]:

- El material a inspeccionar. Un conocimiento del tipo de material puede ayudar a saber si, en las zonas adyacentes al cordón, se va a encontrar estructura de grano grueso o fino; lo que determinaría la frecuencia a utilizar en el ensayo.

- El espesor de la placa. Saber el espesor permite seleccionar el ángulo de la zapata a emplear, como además ayuda a saber las distancias de salto y medio salto (zona de barrido) por donde se desplazará el transductor al realizar la inspección.
- La preparación de las uniones del cordón. Esto facilita la interpretación de discontinuidades e infiere la localización de las mismas.
- El procedimiento de soldadura utilizado. Es de vital importancia saber esto ya que permite saber con anticipación que tipo de discontinuidades se encontrarán, que con mayor frecuencia se pueden apreciar. Un ejemplo es: en un procedimiento con CO_2 no se encontrarán inclusiones de escoria, ya que el electrodo va protegido con gas y debe en cambio tener en cuenta que este tipo de soldadura es propensa a discontinuidades tales como: porosidad y falta de fusión.
- Si la soldadura ha sufrido un tratamiento térmico o no. Esto provocan cambios en la estructura de grano del cordón, lo cual puede influir en la elección en la frecuencia del palpador.

A continuación, se describe un procedimiento importante para la inspección de soldaduras a tope aplicando parte del código D1.1 de la AWS [4].

Al acoplar un palpador de haz angular a la superficie de dos placas metálicas soldadas a tope, el palpador genera ondas ultrasónicas en forma de zigzag a través de la placa como se presenta en la Fig. 2.13.

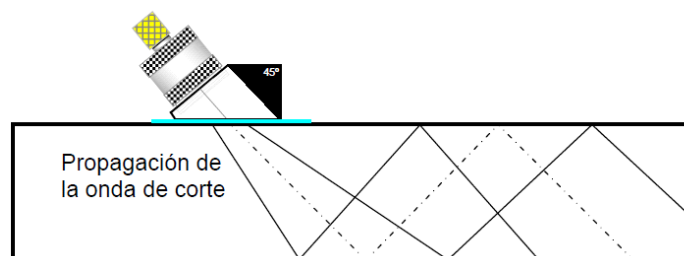


Fig. 2.13. Propagación del haz con palpador angular.

La reflexión en la esquina inferior del borde de la placa se efectúa a una distancia $SD/2$ (distancia de medio salto, ver, Fig. 2.14a) y la distancia en

que se genera la reflexión en la esquina superior se denomina distancia de salto (SD), tal como se presenta en la Fig. 2.14b, y se le denomina “trayectoria en V” dada la forma del recorrido del haz ultrasónico [4].

La distancia recorrida por el haz hasta la superficie inferior de la placa se conoce como distancia angular 1 (DA_I) o “primera pierna” de la trayectoria en “V”, y la distancia desde la superficie inferior hasta la superior se le llama distancia angular 2 (DA_{II}) o “segunda pierna”. Por trigonometría se determina que: $SD = 2e * tg \theta$.

Conociendo el ángulo de refracción del haz ultrasónico (θ), (ángulo marcado en el palpador), y el espesor se pueden calcular las distancias de salto (SD) y de medio salto (SD/2).

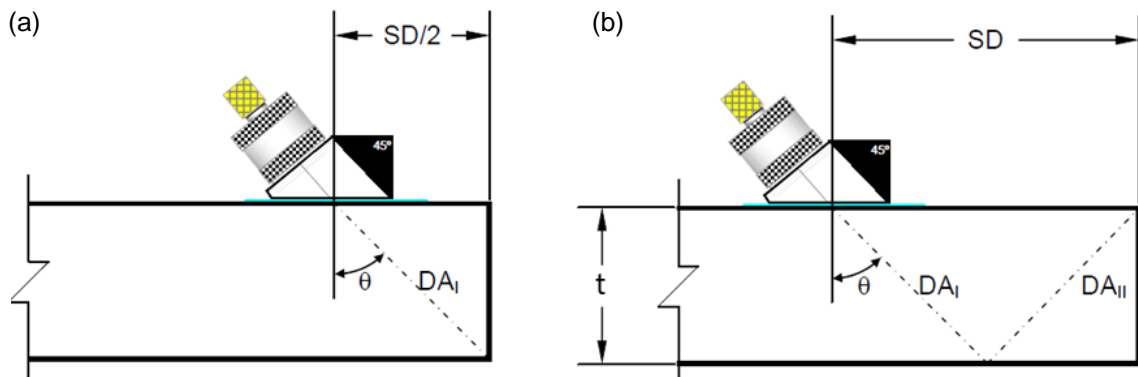


Fig. 2.14. Representación de DA_I & DA_{II} : (a) Distancia de medio salto; y (b) Distancia de salto.

Fácilmente se puede detectar la ubicación de una discontinuidad interna en placas siempre que el equipo haya sido calibrado para determinar la distancia angular (DA) como se presenta en Fig. 2.15b, la distancia superficial (DS) y la profundidad se pueden detectar directamente por trigonometría [4].

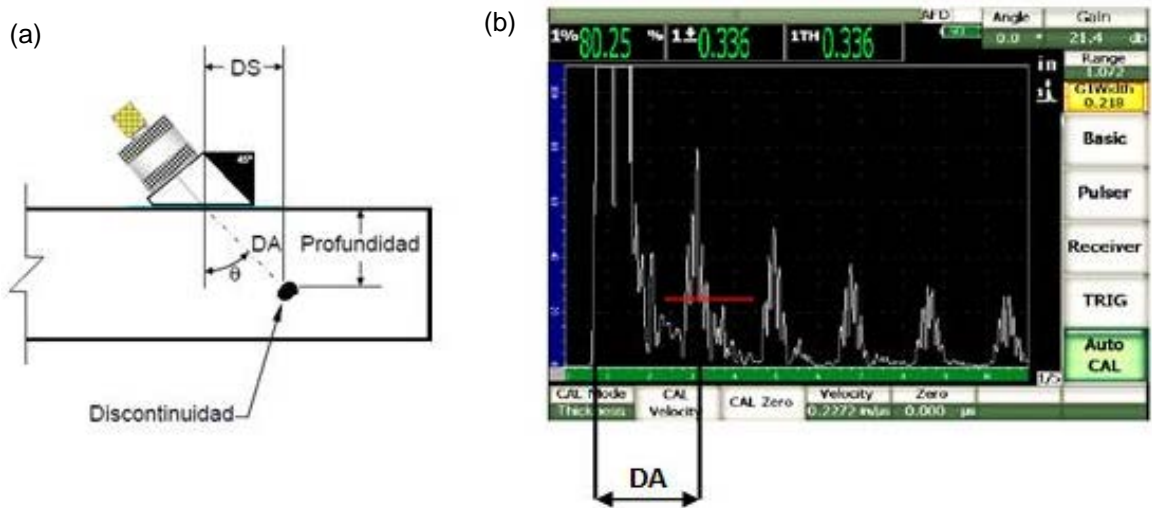


Fig. 2.15. Detección de posición de una discontinuidad: (a) Esquema de la discontinuidad; y (b) Determinación de la distancia angular de la discontinuidad.

$$DS = DA * \text{sen } \theta$$

$$\text{Profundidad} = DA * \text{cos } \theta$$

Puede ocurrir el caso que la discontinuidad no se encuentre en la primera pierna por lo que si la discontinuidad se localiza después de una reflexión de haz (en la segunda pierna) y con la ayuda de nuestro equipo se observa en la pantalla del equipo que la distancia angular (DA) a la que aparece la discontinuidad es lógicamente mayor que la primera pierna, entonces podemos concluir una imagen como la siguiente (ver, Fig. 2.16) [4].

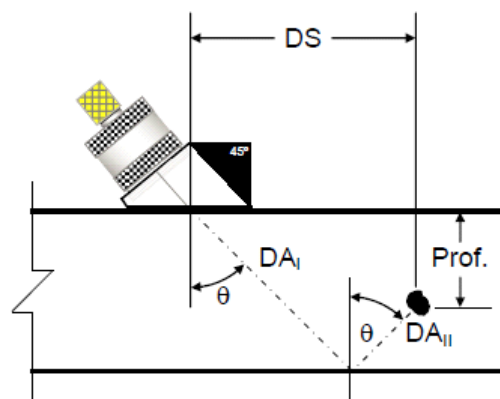


Fig. 2.16. Detección de discontinuidad en segunda pierna.

Para determinar la ubicación de esta discontinuidad se deberá ocupar:

$$DS = (DA_I + DA_{II}) * \text{sen}\theta$$

$$\text{Prof}' = 2e - (DA_I + DA_{II}) * \text{cos}\theta$$

Si $(DA_I + DA_{II}) = DA_t$ (Distancia angular total), se tiene:

$$\text{Prof}' = 2e - (DA_t) * \text{cos}\theta$$

Al inspeccionar un cordón de soldadura es necesario barrer toda la sección transversal del cordón, para ello el operario deberá desplazar el palpador entre las distancias correspondientes a medio salto y un salto. Efectivamente, desde la posición de medio salto el haz incide en la raíz del cordón. Al desplazar hacia atrás el palpador, el haz barre paulatinamente la sección transversal del cordón, desde la raíz hasta el refuerzo, instante en el cual el palpador se encontrará a la distancia de un salto; como se ve en la Fig. 2.17 [4].

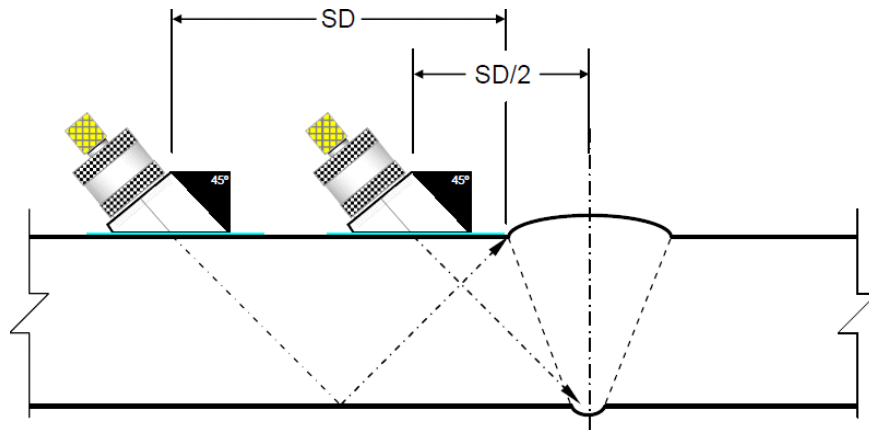


Fig. 2.17. Distancias de salto y medio salto.

Con el fin de efectuar un barrido eficiente y confiable, se hace la recomendación de establecer un área sobre la superficie del metal base, desde la mitad de la soldadura hasta la distancia de medio salto y de un salto. A esta región se le llama “zona de barrido”, este es el espacio donde se recomienda realizar los desplazamientos y movimientos del transductor. El borde de la zona de barrido, que corresponde a la distancia de salto se le

denomina “límite lejano” y el borde que corresponde a la distancia de medio salto se le denomina “límite cercano”, como se presenta en la Fig. 2.18.

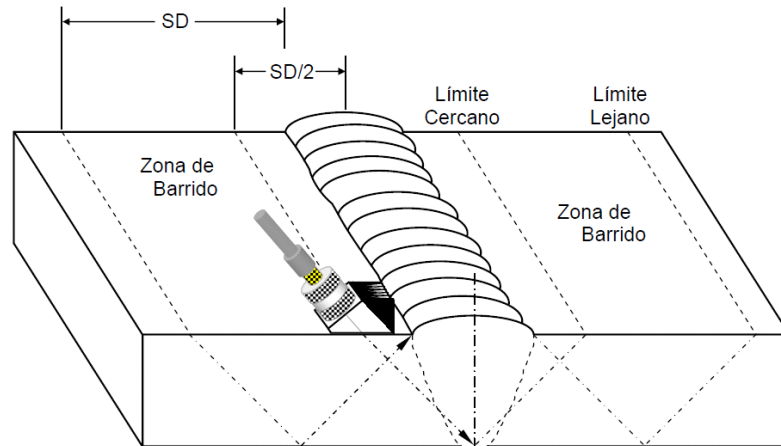


Fig. 2.18. Zona de barrido, límite cercano y lejano.

- a) Patrón de barrido: El barrido se hace entre un límite cercano o adyacente y un límite lejano, pero surge la duda de cómo se realiza el desplazamiento de la inspección, a continuación se describen los desplazamientos del palpador en la pieza: antes aclarar que, para detectar eficientemente las discontinuidades, haya o no sido esmerilada la pieza, el palpador se debe mantener perpendicular al eje de la soldadura y moviéndolo sobre la zona de barrido [4].
- Movimiento de escaneo “A” o radial: El ángulo de oscilación que se debe respetar según la norma D1.1 de la AWS, es de 10° a cada lado de la línea central del transductor (ver, Fig. 2.19).
 - Movimiento de escaneo “B” o transversal: Para cubrir totalmente la sección transversal de la soldadura, se debe realizar el desplazamiento del palpador dentro de la zona de barrido, hacia delante y hacia atrás, desde el límite cercano hasta el límite lejano o viceversa, como se presenta en Fig. 2.19.
 - Movimiento longitudinal: Se hace necesario realizar un movimiento lateral, paralelo al eje de la soldadura, en todo lo largo de la junta. Según norma específica, el traslape mínimo entre cada

desplazamiento del palpador debe ser no mayor al 50% de su dimensión transversal (ver, Fig. 2.19).

Se debe tener en consideración que al combinar los 3 movimientos se puede tener un mayor parámetro de inspección. Al combinar estos movimientos, el patrón de barrido puede ser en zig-zag con cambios agudos de dirección o con cambios cuadrados (ver, Fig. 2.19).

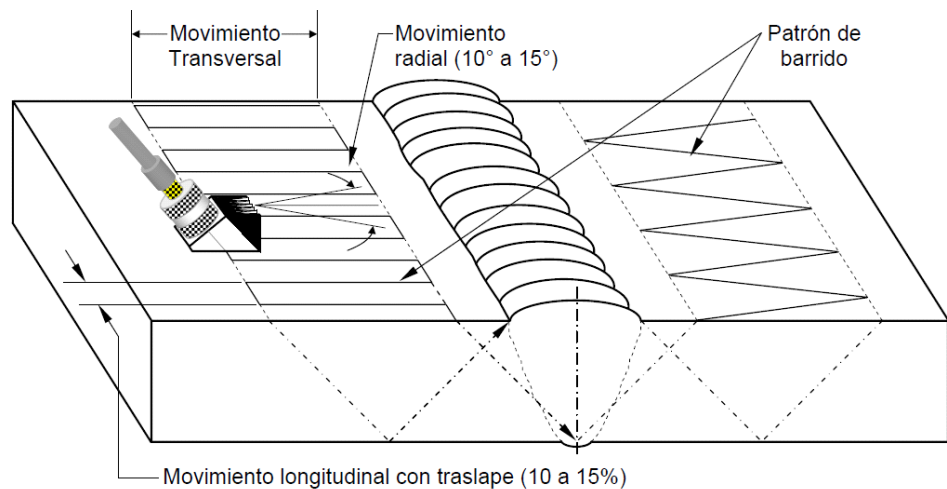


Fig. 2.19. Ilustración de patrones de barrido para detectar discontinuidades

En la Fig. 2.20 se presenta cómo se debería marcar las placas metálicas soldadas a tope. La normativa dice que se debe marcar un eje “**x**” que debe ser paralelo al cordón de soldadura a una posición $SD/2$ y un eje “**y**” será marcado para diferenciar la posición + o - del eje “**x**” y medir la distancia de la falla al punto cero del palpador, a su vez se incluye la zona afectada térmicamente (ZAT) debido al calentamiento del proceso de soldadura [4].

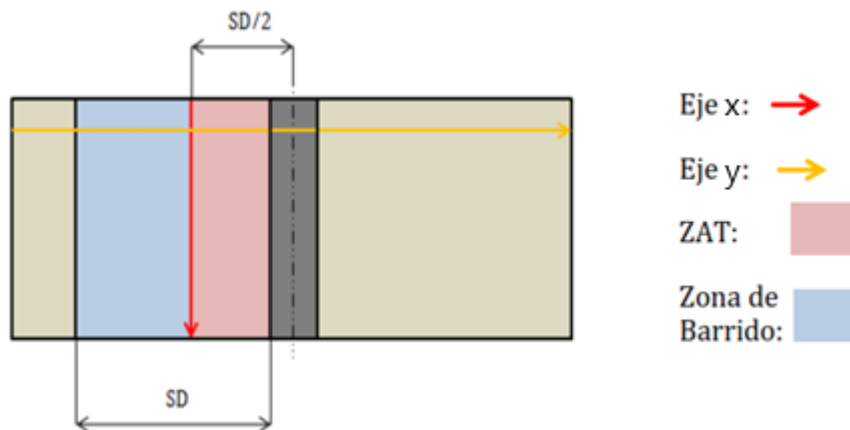


Fig. 2.20. Marcado de la placa soldada a tope.

Si se desea evaluar discontinuidades se debe tomar en consideración una serie de factores que afectan a esta práctica:

- La capacidad en la calibración del equipo.
- El poder de resolución.
- La condición superficial.
- La exactitud al determinar el ángulo de refracción.
- La pérdida de sensibilidad.
- La divergencia del haz ultrasónico.
- Las características de la discontinuidad. y
- La experiencia del técnico.

Las discontinuidades pueden ser clasificadas como pequeñas (cuando su área es más pequeña que la sección transversal del haz ultrasónico) o grandes (cuando la discontinuidad es más grande que la sección transversal del haz ultrasónico). El tamaño de la discontinuidad puede ser determinado por medio de dos diferentes métodos, que a continuación se describen:

- Método por comparación con reflectores de referencia (para discontinuidades pequeñas).

Este método es en el que se utilizan ranuras, barrenos laterales o barrenos de fondo plano de diferentes dimensiones, para la calibración en sensibilidad del instrumento ultrasónico. El tamaño de

la discontinuidad se determina comparando la máxima amplitud de su indicación con la amplitud de la indicación producida por el reflector de referencia, es una determinación estática del tamaño. La amplitud de las indicaciones de discontinuidades también puede ser utilizada como una medición de la severidad de la discontinuidad.

- El método por caída de amplitud es muy utilizado cuando se tienen discontinuidades más grandes que el palpador. Para ello, se recurre a una técnica conocida como “Técnica de caída de 6 dB”. Gráficamente se representa en la Fig. 2.21. La técnica consiste en lo siguiente:

Después de obtener la máxima amplitud de la indicación de una discontinuidad (maximización), se desplaza el palpador en una dirección, siguiendo la dirección en la que está orientada la discontinuidad, y se detiene el desplazamiento en el instante que la indicación de la discontinuidad sufra una caída de amplitud al 50%, con respecto a su amplitud máxima, lo que equivale a -6 dB.

La base de esta técnica es asumir que la indicación de la discontinuidad tiene una caída de amplitud a la mitad cuando la parte central del haz se encuentra en el extremo de la discontinuidad, esto es, que se está detectando el borde de la discontinuidad en ese punto.

Después de marcar la posición de los puntos más alejados entre sí, entonces se puede determinar directamente la longitud de la discontinuidad, midiendo la distancia entre los puntos obtenidos, que corresponden a los extremos de la discontinuidad. Para determinar la longitud de discontinuidades pequeñas, se tiene menor exactitud que para discontinuidades grandes [4].

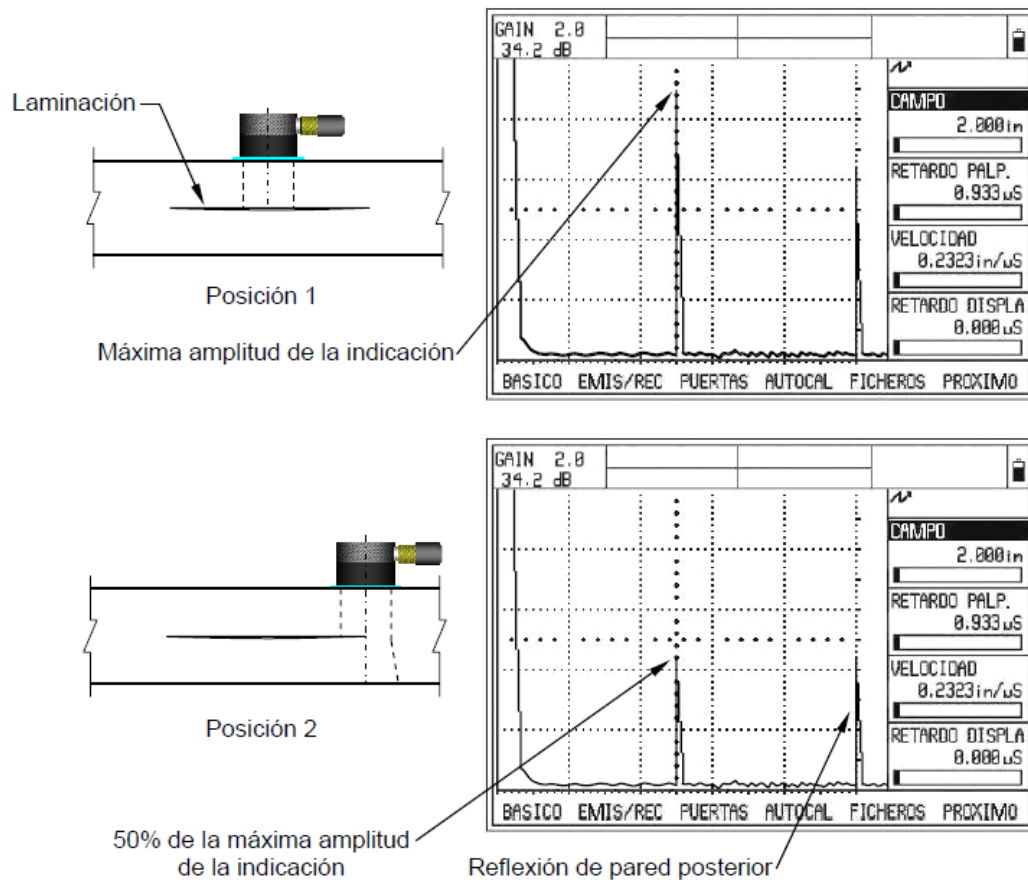


Fig. 2.21. Técnica de caída de 6 decibeles.

2.4. PROPUESTA DE NORMATIVA PARA LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA MATRIZ EN FASE (PHASED ARRAY)

La matriz en fase (Phased array) es una técnica ultrasónica de inspección computarizadas de última generación, capaz de proveer registro permanente, con alta probabilidad de detección de grietas e imperfecciones en fase temprana, de esta forma, evita paradas innecesarias de actividad y advertir de costosas reparaciones en las instituciones.

Su eficacia procede de la combinación de múltiples ángulos y profundidades focales, mediante una sonda que realiza varias inspecciones sin necesidad de modificar la configuración del transductor.

Esta técnica es posible utilizarla en materiales convencionales y especiales como los de alta aleación y de acero inoxidable austenítico [7].

Algunas ventajas de la técnica matriz en fase (phased array) son las siguientes:

- Ahorra tiempo al permitir inspeccionar espesores gruesos en tiempos cortos.
- Con técnicas automatizadas, a diferencia del ultrasonido manual, es que se obtiene mejor barrido volumétrico, la probabilidad de detección es mayor y hay repetitividad en el ensayo.
- Permite ahorrar costos al no requerir zonas de exclusión que detengan la producción por riesgo de radiaciones ionizantes.
- Registro permanente físico y digital al 100% del volumen de soldaduras.

Esta técnica es aplicada en materiales que requieran:

- Inspecciones de corrosión.
- Inspección de soldaduras.
- Mediciones de espesor.
- Detección de grietas y defectos.
- En cualquier lugar donde se hayan realizado pruebas de ultrasonido convencionales.

La normativa 13588 de la ISO, aplica la tecnología de matriz en fase (phased array) en ensayos ultrasónicos automatizados a la inspección de juntas soldadas por fusión en materiales metálicos con mínimo de 6 mm de espesor, también es aplicada a uniones soldadas de penetración completa, de geometría simple en placas, tuberías y recipientes, en el caso que la soldadura y el material base sea acero al carbono de baja aleación.

Los parámetros ultrasónicos que dependen del material como la velocidad deben tener valores de $(5920 \pm 50 \text{ m/s})$ para ondas longitudinales y $(3255 \pm 30 \text{ m/s})$ para ondas transversales para que el método sea aplicable.

Esta norma internacional brinda orientación sobre las capacidades y limitaciones de la técnica, para la detección, ubicación, dimensionamiento y caracterización de discontinuidades en uniones soldadas por fusión. Permite la evaluación de las indicaciones con fines de aceptación basándose en amplitud (tamaño de reflector equivalente) y longitud [7].

De igual forma esta norma no es aplicable para:

- ✓ Metales de grano grueso y soldaduras austeníticas; y
- ✓ Pruebas automatizadas de soldaduras durante la producción de productos de acero.

A continuación, se presentan partes importantes a tener en cuenta para la realización de los ensayos con la técnica matriz en fase.

A) Niveles de prueba

Los requisitos de calidad para las uniones soldadas están asociados principalmente con el material, el proceso de soldadura y las condiciones de servicio.

En la Tabla 2.7 se presenta los requisitos mínimos para cada nivel de prueba y en todos los casos la configuración se debe verificar con un bloque de referencia. Para dar cabida a todos estos requisitos, la norma cuenta con cuatro niveles de prueba: A (ver, Fig. 2.22), B (ver, Fig. 2.23), C (ver, Fig. 2.24) y D, cada uno correspondiente a una probabilidad diferente de detección de imperfecciones.

Desde el nivel de prueba A hasta el nivel de prueba C, se logra una mayor probabilidad de detección mediante una mayor cobertura de prueba, por ejemplo, número de incidencias, combinación de técnicas. El nivel de prueba D se puede acordar para una aplicación especial utilizando un procedimiento escrito, y debe tener en cuenta los requisitos generales de esta Norma Internacional. Esto incluye pruebas de metales que no sean acero ferrítico, pruebas de soldaduras de penetración parcial, pruebas con equipos automatizados, pruebas a temperaturas del objeto fuera de la distancia.

En los casos en que el escaneo es de una cara, se usará y almacenará la mitad y el salto completo; si el escaneado se realiza desde ambas caras, medio salto es suficiente.

B) Información requerida antes de la prueba.

Hay información que es requerida antes de realizar la prueba, esta se describe brevemente en la Tabla 2.8, además debe contar con un nivel apropiado de acuerdo a la EN 473, y la 9712 de la ISO.

Tabla 2.7. Descripción de los niveles de prueba.

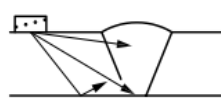
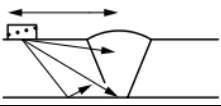
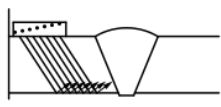
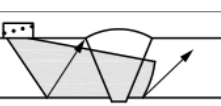
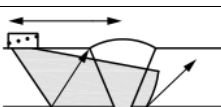
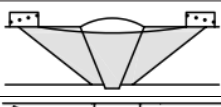
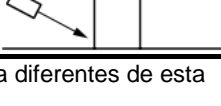
Modo	Nivel de prueba			Ejemplo de bocetos
	A	B	C	
	Bloque de referencia (ver Figs. 2.22 - 2.24)			
	Bloque A	Bloque B	Bloque C	
Configuración de prueba				
Ángulos fijos en fijo posición de la sonda para soldar (escaneos de línea)*	Dos lados	No apto como técnica apropiada	Dos lados	
Ángulos fijos con escaneo de trama*	Un lado	Un lado	Un lado	
Escaneo electrónico en la posición de la sonda fija (escaneo de línea)*	Un lado	Dos lados con dos ángulos ***	Dos lados	
S-scan en la posición fija de la sonda para soldar (escaneo de línea)*	Dos lados o dos sondas	Dos lados o dos posiciones de sonda	Dos lados o dos posiciones de sonda	
Ráster S-scan	No recomendado		Un lado	
TOFD generado con matriz en fase*	No recomendado, prueba TOFD de acuerdo con la ISO 10863		Una configuración	
Escaneo sesgado**	Si lo requiere la especificación			
* Para el nivel de prueba C, se combinarán al menos dos configuraciones de prueba diferentes de esta tabla; al menos uno de ellos será S-scan o TOFD.				
** Si la detección de discontinuidades transversales es requerida por especificación, se aplicará una configuración de prueba adicional adecuada. Se puede utilizar una sonda sesgada o un haz sesgado electrónicamente.				
*** Al menos 10° de diferencia.				

Tabla 2.8. Requerimientos pre ensayo.

Elementos que se deben definir antes del desarrollo del ensayo	Información específica requerida por el operador antes de la prueba	Procedimiento de prueba escrita
<ul style="list-style-type: none"> • Criterios de aceptación • Especificación de bloques de referencia • Material en etapa de fabricación u operación • Detalles de la soldadura (zona afectada por el calor) • Calificación del personal 	<ul style="list-style-type: none"> • Procedimiento escrito del ensayo • Tipo de material o forma del producto (tratamiento térmico, forjado o laminado) • Información sobre el proceso de soldadura 	<ul style="list-style-type: none"> • Técnicas del ensayo • Requisitos de capacitación/calificación del personal • Requisitos de equipo (frecuencia, tasa de muestreo, paso entre elementos, tamaño del elemento) • Bloques de referencia • Condiciones de la superficie • Niveles de aceptación y/o niveles de registro.

C) Requisitos de personal y equipos.

En cuanto a la calificación del personal, este además debe tener un conocimiento general de inspección de soldadura ultrasónica, el personal debe estar familiarizado y tener experiencia práctica en el uso de arreglos en fase (Phased Array) [7].

El equipo ultrasónico utilizado para la prueba de matriz en fase debe cumplir con los requisitos de EN 126681, EN 126682 y EN 126683 según corresponda. Así mismo para la selección de componentes se debe acudir a CEN / TR 15134 (norma española).

D) Preparación para la prueba.

Como la inspección es para soldaduras, se debe tener en cuenta que, para las pruebas en materiales con etapa de fabricación, el volumen de prueba debe incluir la soldadura y el material de base durante al menos 10 mm a cada lado de la soldadura o el ancho de la zona afectada por el calor

La norma hace especificación de un incremento de escaneo, pero eso depende del espesor del material, para espesores de hasta 10 mm, el incremento de exploración no debe ser superior a 1 mm, para espesores entre 10 y 150 mm, el incremento de escaneo no debe ser mayor a 2 mm, por encima de 150 mm, se recomienda un incremento de escaneo de 3 mm.

La norma hace énfasis cuando se deba examinar soldaduras de geometría compleja, por ejemplo, materiales de unión de soldadura de espesor desigual, materiales que se unen en ángulo. Estas pruebas se deben planificar cuidadosamente y requieren un conocimiento más extenso de la propagación del sonido y siempre se deben llevar a cabo bajo el nivel de prueba D [7].

La norma hace la recomendación que las superficies de exploración deben ser uniformes y libres de materias extrañas que puedan interferir con el acoplamiento de la sonda (p. ej., óxido, escamas sueltas, salpicaduras de soldadura, muescas, ranuras). La ondulación de la superficie de ensayo no debe dar lugar a un espacio superior a 0.5 mm entre una sonda y la

superficie de ensayo. Estos requisitos se garantizarán revistiendo la superficie de escaneo con un excelente acoplador que proporcione una transmisión constante de ultrasonido.

La rugosidad de la superficie no debe exceder 6.3 μm para superficies mecanizadas, ni superior a 12.5 μm para superficies granalladas.

Para casos de no poseer acoplante y sondas especiales para altas temperaturas, la superficie debe estar entre el intervalo de 0 y 50 $^{\circ}\text{C}$.

E) Ajustes de distancia y sensibilidad.

Para llevar a cabo el ensayo ultrasónico es necesario realizar ajustes de distancia y sensibilidad, estas se deben realizar antes de cada prueba, configuraciones como la posición de la sonda (PP) y los parámetros de dirección [7].

La relación señal/ruido se debe optimizar con un mínimo de 12 dB para las señales de referencia, cuando se usan el modo A-scan, o con un mínimo de 6 dB cuando se usan imágenes.

Se debe realizar la configuración de ventana de tiempo de eco de pulso.

En el equipo después de seleccionar el modo (ángulo fijo, E-scan, S-scan) se llevará a cabo lo siguiente:

- ✓ La sensibilidad se debe establecer para cada haz generado (ángulo de haz, punto focal, etc.); y
- ✓ Cuando se utiliza una sonda con cuña, la sensibilidad se debe ajustar con la cuña colocada.

Se puede aplicar diferentes modos de enfoque, la sensibilidad se establecerá para cada haz enfocado, existe el enfoque de profundidad estático y dinámico.

En el equipo ultrasónico el uso de la ganancia con corrección de ángulo (ACG) y la ganancia con corrección de tiempo (TCG) permite la visualización de señales para todos los ángulos del haz y todas las distancias con la misma amplitud [7].

Para las pruebas de soldadura aplicando los modos de ángulos fijos, E-scan, S-scan, se debe establecer la sensibilidad de referencia para cada haz

generado de acuerdo con la norma 17640 de la ISO, incluida la corrección de transferencia.

La comprobación de los ajustes se realizará cada 4 h de uso del equipo, si el ensayo durara más de las 4 h la comprobación se realizará en el instante que termine la prueba.

Si se utilizó un bloque de referencia para el ajuste inicial, se utilizará el mismo bloque de referencia para la comprobación. Alternativamente, se puede usar un bloque más pequeño con propiedades de transferencia conocidas [7].

Si se encuentran desviaciones de los ajustes iniciales, con la sensibilidad se debe llevar a cabo las correcciones de la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Correcciones de sensibilidad y distancia.

Sensibilidad	
Desviaciones ≤ 4 dB	No se requiere acción; los datos pueden ser corregidos por software
Desviaciones > 4 dB	Se comprobará la cadena completa de medición. Si no se identifican componentes defectuosos, se corregirán los ajustes y se repetirán todas las pruebas realizadas desde la última comprobación válida.
NOTA 1: Se debe alcanzar la relación señal-ruido requerida.	NOTA 2: La desviación de 4 dB se aplica a las pruebas de eco de pulsos. Para se permite la prueba TOFD con una desviación de 6 dB.
Distancia	
Desviaciones ≤ 0.5 mm o 2% de distancia de profundidad, el que sea mayor	No se requiere acción
Desviaciones >0.5 mm o 2% de distancia de profundidad, el que sea mayor	Se corregirán los ajustes y se repetirán todas las pruebas realizadas desde la última comprobación válida.

Según el nivel de la prueba (A, B, C, o D), se utilizarán bloques de referencia para determinar la idoneidad de la prueba, el bloque debe estar hecho de un material similar al objeto de prueba. Se recomienda que el espesor de los bloques de referencia sea entre 0.8 y 1.5 veces el espesor del objeto de prueba con una diferencia máxima de espesor de 20 mm en comparación con el objeto de prueba. La longitud y el ancho del bloque de

referencia se deben elegir de manera que todos los defectos artificiales se puedan escanear correctamente [7].

Para la prueba de soldaduras longitudinales en objetos de prueba cilíndricos, se deben usar bloques de referencia curvos que tengan diámetros de 0.9 a 1.5 veces el diámetro del objeto de prueba y para objetos de prueba que tienen un diámetro ≥ 300 mm se puede utilizar un bloque de referencia plano [7].

Para un espesor entre 6 y 25 mm, se requieren al menos tres reflectores; para espesores > 25 mm se requieren al menos cinco reflectores. “Los reflectores de referencia típicos son orificios perforados lateralmente, muescas y orificios de fondo plano”.

Los detalles del bloque de referencia según los niveles de prueba se dan en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Niveles de prueba y bloques de referencia.

Nivel de prueba	Bloque de referencia
A	Ver Fig. 2.22
B	Ver Fig. 2.23
C	Ver Fig. 2.24
D	Como se especifica.

Clave:

D_d : es el diámetro del orificio lateral perforado-
 l_o : es la longitud del orificio lateral perforado-
 t : es el espesor del bloque.

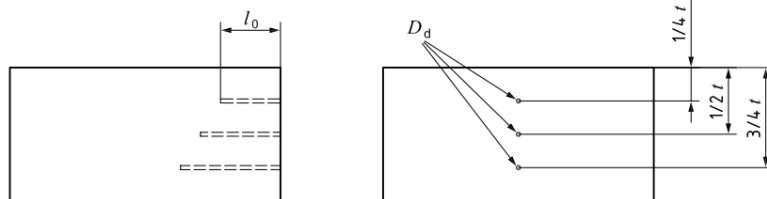
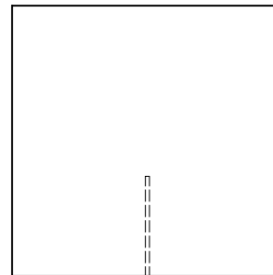
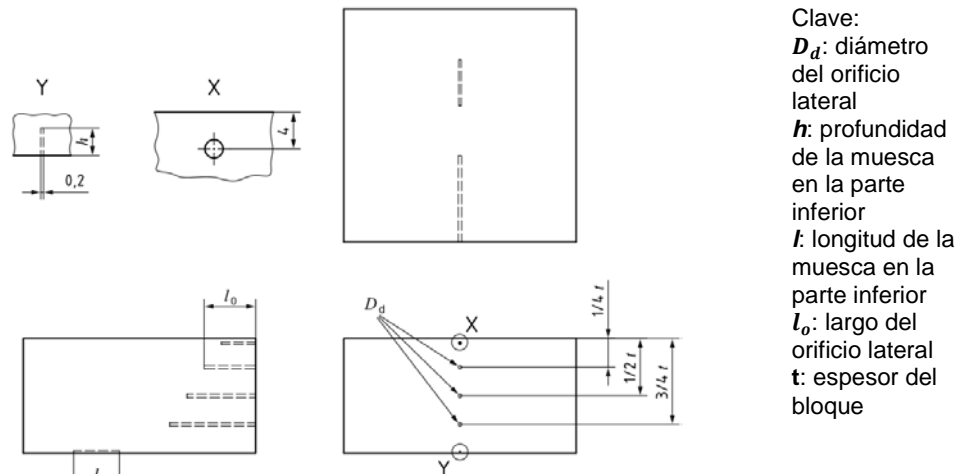


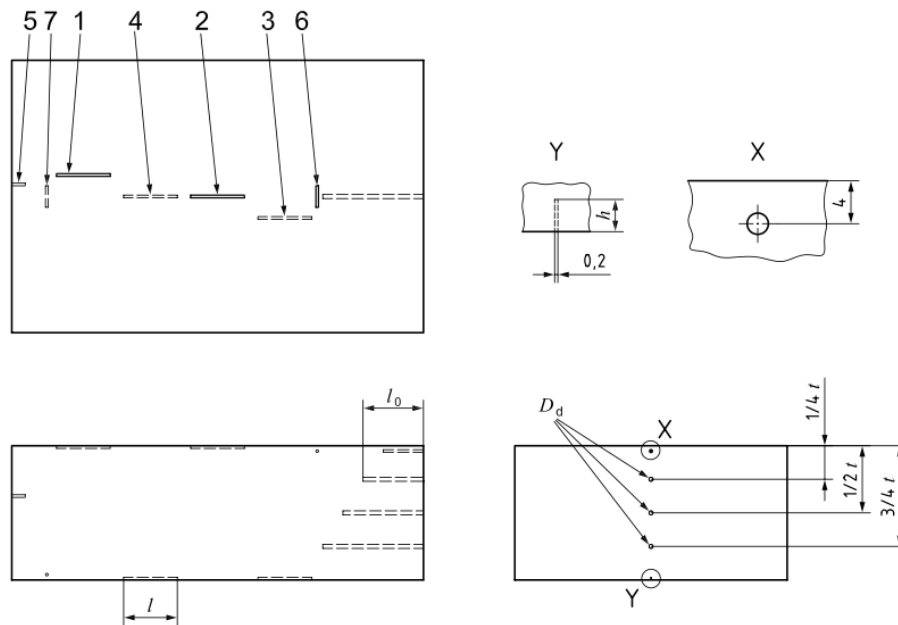
Fig. 2.22. Bloque de referencia recomendado para el nivel de prueba A.



Clave:
 D_d : diámetro del orificio lateral
 h : profundidad de la muesca en la parte inferior
 l : longitud de la muesca en la parte inferior
 l_0 : largo del orificio lateral
 t : espesor del bloque

El detalle X presenta un orificio lateral ubicado a 4 mm por debajo de la superficie, con un diámetro de 2 mm y una longitud mínima de 30 mm. Alternativamente, se puede usar una muesca en la superficie con las mismas dimensiones que se describen en la Tabla 2.11.

Fig. 2.23. Bloque de referencia recomendado para el nivel de prueba B.



Key

- | | | | |
|-------|------------------------------|--|--|
| D_d | Diámetro del agujero lateral | 1, 2 | Muestras en la superficie del lado cercano |
| h | Profundidad de la muesca | 3, 4 | Muestras de la superficie del lado lejano |
| l | Longitud de las muescas | 5 | Muesca en bisel de soldadura imaginario |
| l_0 | Longitud del agujero lateral | Si lo requiere la especificación: | |
| t | Espesor del bloque | 6 | Muesca transversal de la superficie del lado cercano |
| | | 7 | Muesca transversal de la superficie del lado lejano |

El detalle X presenta un orificio lateralmente perforado ubicado a 4 mm por debajo de la superficie, de 2 mm de diámetro y longitud mínima de 30 mm. Alternativamente, se puede usar una muesca en la superficie con las mismas dimensiones que se describen en la Tabla 2.11.

Las muescas 2 y 4 están ubicadas en la línea central imaginaria de la soldadura. Las muescas 1 y 3 se colocan en los bordes del volumen a probar. La muesca 5 se coloca en el bisel de soldadura imaginario con una orientación de $\pm 5^\circ$ al bisel de la soldadura. Las dimensiones y la ubicación de la muesca 5 serán las especificadas.

Debe haber un volumen en el bloque de referencia que se mantenga libre de reflectores artificiales. El alcance de este el volumen debe exceder el ancho del haz de sonido. Este volumen debe ser simétrico con respecto a la línea central de la soldadura

Fig. 2.24. Bloque de referencia recomendado para el nivel de prueba C

Para el nivel de prueba D, se deben hacer bloques especiales con la misma configuración, propiedades del material base, propiedades del material de soldadura, proceso de soldadura y adicionales a los bloques de prueba descritos para los niveles de prueba B y C; se agregarán reflectores adicionales [7].

En las Tablas 2.11 - 2.13 se describen los reflectores de referencia para diferentes espesores de pared.

Tabla 2.11. Longitud y profundidad de las muescas en el bloque de referencia.

t, mm	l, mm	h, mm	b, mm
$6 < t \leq 40$	t	1 ± 0.2	0.2 ± 0.05
$40 < t \leq 60$	40 ± 2	2 ± 0.2	0.2 ± 0.05
$60 < t \leq 100$	50 ± 2	2 ± 0.2	0.2 ± 0.05
$t > 100$	60 ± 2	3 ± 0.2	0.2 ± 0.05

Tabla 2.12. Diámetro de los orificios laterales.

t, mm	D_d , mm
$6 < t \leq 25$	2.5 ± 0.2
$25 < t \leq 50$	3.0 ± 0.2
$50 < t \leq 100$	4.5 ± 0.2
$t > 100$	6.0 ± 0.2

Nota: Si se requieren orificios en la superficie del lado cercano, estos deben tener un diámetro de 2 mm (ver, Fig. 2.23).

Tabla 2.13. Longitud de los orificios laterales y de las muescas superficiales para espesores $t > 25$ mm.

Profundidad	Tres agujeros en el mismo bloque Longitud mínima, mm	Tres bloques separados, un agujero por bloque Longitud mínima, mm	Tres muescas en el mismo bloque Longitud mínima, mm	Tres bloques separados, una muesca por bloque Longitud mínima, mm
$\frac{1}{4} t$	$l_0 = 45$	45	40	40
$\frac{1}{2} t$	$l_0 + 15$	45	40	40
$\frac{3}{4} t$	$l_0 + 30$	45	40	40

F) Calificación del procedimiento

Se requiere la calificación del procedimiento para los niveles de prueba B, C y D. Se debe demostrar que el procedimiento de prueba funciona

aceptablemente en los bloques de referencia. Antes de la primera inspección se debe realizar una calificación satisfactoria del procedimiento.

Una calificación de procedimiento satisfactoria incluye:

- a) La detección de todos los reflectores requeridos;
- b) Capacidad de dimensionamiento según lo requiera la especificación;
- c) Prueba de cobertura en profundidad y anchura.

G) Pruebas de soldadura

Antes de la prueba inicial, la cobertura se debe verificar con el plan de escaneo y demostrar en un bloque de referencia adecuado.

Algunas indicaciones detectadas durante el escaneo inicial pueden requerir una evaluación adicional, escaneos compensados, escaneos perpendiculares a la discontinuidad, configuraciones de matriz en fase complementaria, etc.

La velocidad de exploración se seleccionará en función de factores como el número de leyes de retardo, la resolución de exploración, el promedio de la señal, la frecuencia de repetición de pulsos, la frecuencia de adquisición de datos y el volumen a inspeccionar.

H) Almacenamiento de datos

Todos los datos de A-scan que cubran el área de examen se almacenarán y todos los conjuntos de datos con parámetros de configuración se incluirán en el registro de datos.

Todos los datos que se obtengan en la prueba de ensayo se podrán almacenar en la memoria del dispositivo para previa inspección en computadora [7].

I) Interpretación y análisis de datos de matriz en fase

La interpretación y análisis de los datos de arreglos en fase generalmente se realizan de la manera siguiente:

- a) Evaluar la calidad de los datos del arreglo en fase;
- b) Identificar las indicaciones pertinentes;
- c) Clasificar las indicaciones pertinentes como se especifica;
- d) Determinar la ubicación y el tamaño según lo especificado; y

e) Evaluar contra los criterios de aceptación.

Para la evaluación de la calidad de los datos obtenidos se requiere de personal altamente capacitado y experimentado para obtener imágenes del ensayo satisfactorio, ya que existe un proceso de la evaluación de la calidad de las imágenes. El personal técnico decide si se requiere una nueva adquisición de datos (reescaneo).

La técnica de matriz en fase genera imágenes tanto de las discontinuidades en la soldadura como de las características geométricas del objeto de prueba. Para decidir si una indicación en el equipo es relevante (causada por una discontinuidad), se deben evaluar patrones o perturbaciones considerando la forma y la amplitud de la señal en relación con el nivel general de ruido [7].

La amplitud, la ubicación y el patrón de las indicaciones pertinentes pueden contener información sobre el tipo de discontinuidad.

La ubicación de una indicación se determinará a partir de los datos recopilados. El método para determinar la longitud de una indicación estará de acuerdo con el nivel de aceptación aplicado.

La evaluación de indicaciones se puede basar en la amplitud, el tamaño equivalente del reflector o en la altura y la longitud según las especificaciones.

- ✓ La amplitud máxima de cada indicación se evaluará de acuerdo con el nivel de aceptación especificado. La caída de amplitud se puede utilizar para determinar la longitud de una indicación.
- ✓ La altura de una indicación es la extensión en la dirección de la pared. Para indicaciones que muestren altura variable a lo largo de su longitud, la altura se determinará en la posición de escaneo de extensión máxima.

Después de la clasificación de todas las indicaciones pertinentes, la determinación de su ubicación y longitud, y la evaluación, las indicaciones se evaluarán frente a los criterios de aceptación especificados. Y las indicaciones se pueden entonces clasificar como "aceptables" o "no aceptables".

J) Informe de prueba

El informe de ensayo debe contener la siguiente información [7]:

a) Información relacionada con el objeto bajo prueba:

- ✓ Identificación del objeto bajo prueba;
- ✓ Dimensiones, incluido el espesor de la pared;
- ✓ Tipo de material y forma del producto;
- ✓ Configuración geométrica;
- ✓ Ubicación de la(s) junta(s) soldada(s) examinada(s);
- ✓ Referencia al proceso de soldadura y tratamiento térmico;
- ✓ Estado de la superficie y temperatura; y
- ✓ Etapa de fabricación.

b) Información relativa al equipo:

- ✓ Fabricante y tipo de instrumento (de matriz en fase), incluidos los mecanismos de escaneo con números de identificación;
- ✓ Fabricante, tipo, frecuencia de las sondas de matriz en fase, incluido el número y tamaño de los elementos, material y ángulo(s) de las cuñas con números de identificación;
- ✓ Detalles de los bloques de referencia con números de identificación si es necesario; y
- ✓ Tipo de acoplante utilizado.

c) Información relativa a la tecnología de prueba:

- ✓ Nivel de prueba y referencia a un procedimiento de prueba escrito;
- ✓ Propósito y alcance de la prueba;
- ✓ Detalles de datum y sistemas de coordenadas;
- ✓ Método y valores utilizados para los ajustes de rango y sensibilidad;
- ✓ Detalles del procesamiento de la señal y la configuración del incremento de escaneo;
- ✓ Plan de exploración; y
- ✓ Limitaciones de acceso y desviaciones de esta Norma Internacional.

d) Información relacionada con la configuración de matriz en fase:

- ✓ Incremento (E-scans) o incremento angular (S-scans);

- ✓ Dimensiones de paso y espacio del elemento;
 - ✓ Enfoque (la calibración debe ser la misma que el escaneo);
 - ✓ Tamaño de apertura virtual, es decir número de elementos y ancho de elemento;
 - ✓ Números de elementos utilizados para leyes focales;
 - ✓ Documentación sobre el rango angular de cuña permitida del fabricante; y
 - ✓ Calibración documentada, TCG y compensación de ganancia de ángulo.
- e) Información relativa a los resultados de las pruebas:
- ✓ Referencia a los archivos de datos sin procesar la matriz en fase;
 - ✓ Imágenes de matriz en fase de al menos aquellos lugares donde se han detectado indicaciones relevantes en copia impresa, todas las imágenes o datos disponibles en formato electrónico;
 - ✓ Criterios de aceptación aplicados;
 - ✓ Datos tabulados que registren la clasificación, ubicación y tamaño de las indicaciones relevantes y los resultados de la evaluación;
 - ✓ Puntos de referencia y detalles del sistema de coordenadas;
 - ✓ Fecha de la prueba; y
 - ✓ Nombres, firmas y certificación del personal.

El acoplante que se aplica para una adecuada adherencia debe ser un líquido con una viscosidad intermedia y con una textura gelatinosa para permitir la transferencia de las ondas ultrasónicas emitidas a la pieza inspeccionada, esto con el objetivo que, si existiera algún espacio de aire entre la pieza y la sonda, el ensayo correría el riesgo que no se realice correctamente y las lecturas no serían 100% confiables.

El líquido acoplante deben tener las características siguientes [3]:

- ✓ Una viscosidad adecuada,
- ✓ Contener excelente humectabilidad,
- ✓ Tener baja atenuación (el sonido se debe transmitir al 100%),
- ✓ Se debe encontrar en el mercado a un bajo costo,

- ✓ Debe ser removible al terminar el ensayo,
- ✓ No ser tóxico,
- ✓ No ser corrosivo, y
- ✓ Poseer impedancia acústica adecuada.

Los acoplantes que se utilizan para la práctica de matriz en fase (phased array) son los siguientes [3]:

- ✓ Grasa,
- ✓ Glicerina,
- ✓ Vaselina,
- ✓ Propilenglicol, o
- ✓ Aceite de Silicón

2.5. NORMA E 273 DE LA ASTM, PRÁCTICA PARA REALIZAR EXAMEN DE ULTRASONIDO EN TUBERÍA SOLDADA

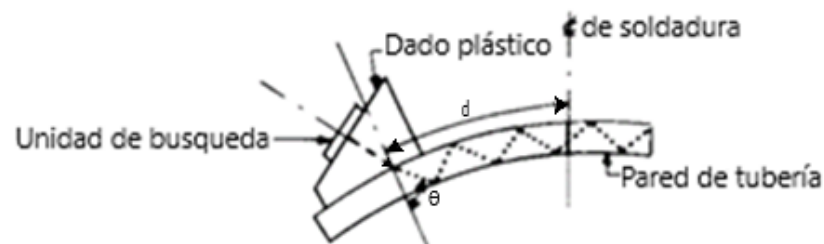
Esta norma describe el examen ultrasónico general de procedimientos para la detección de discontinuidades en una soldadura, zonas adyacentes afectadas por el calor de tubería soldada o tubo escaneando con movimiento relativo entre la búsqueda unidad y tubería o tubo. Cuando el contacto o la inmersión desenfocada se emplean unidades de búsqueda, esta práctica está destinada para productos tubulares que tienen diámetros exteriores especificados ≥ 50 mm (≥ 2 pulg) y espesores de pared especificados de 3 a 27 mm (1/8 a 1 1/16 pulg). Cuando está bien enfocado se emplean unidades de búsqueda por inmersión, esta práctica se puede aplicar a materiales de menor diámetro y más delgados de pared [8].

Todas las superficies del material que se examinen de acuerdo con esta práctica deberán estar limpias de incrustaciones, suciedad, rebabas, escoria, salpicaduras u otras condiciones que puedan interferir con los resultados del examen. La configuración de la soldadura debe ser tal que las señales de interferencia no sean generadas por reflejos de ella. Tratamiento de la

superficie interior y exterior, cordones de soldadura de superficie, como recortar ("escarificar") o enrollar, a menudo se requiere para eliminar las protuberancias que podrían resultar en reflejos falsos.

Esta práctica no establece criterios de aceptación, por lo cual deben ser especificados por las partes usuarias.

Se propagará un haz angular ultrasónico pulsado en la pared de la tubería o tubo por el contacto de la superficie o método de inmersión. En la Fig. 2.25 se presenta la característica de entrada de sonido oblicua en la pared de la tubería para contacto y examen de inmersión desde una unidad de búsqueda. La línea de soldadura se examinará desde ambos lados para asegurar la detección de imperfecciones con una forma u orientación que produce una dirección preferencial de reflexión [8].



NOTA: θ desde 35° a 70°

Fig. 2.25. Proyección de ángulo de onda ultrasónica. (Técnica de contacto)

Los instrumentos, equipos y accesorios deberán ser capaces de producir, recibir, amplificar y mostrar pulsos eléctricos a frecuencias y frecuencias de pulso considerado necesario por las partes usuarias.

Para sistemas de examen por eco de pulso, el contacto o las unidades de búsqueda por inmersión deben producir ondas ultrasónicas que viajan en la tubería o la pared del tubo en un ángulo refractado de 35° a 70° y perpendicular a la costura de la soldadura. Para el lanzamiento/captura o mediante examen de transmisión sistemas, orientación del haz de sonido de entrada que no sea perpendicular a la costura de la soldadura.

Se debe utilizar agua, aceite, glicerina, etc. como acoplante que sea capaz de conducir vibraciones ultrasónicas. Se pueden añadir suavizantes y agentes humectantes al acoplante. El líquido de acoplamiento con todos los aditivos no debe ser perjudicial a la condición de la superficie de la tubería y debe mojar la superficie.

La unidad de búsqueda debe estar dimensionada con respecto al ancho y al ángulo incluido del haz para lograr una cobertura total del espesor de la pared. Esto se puede lograr con una sola unidad de búsqueda que se propaga en una determinada dirección, se pueden utilizar dos o más unidades de búsqueda para que escaneen en cada dirección.

Usando el estándar adecuado, el equipo se debe ajustar para producir fácilmente indicaciones claramente identificables tanto de los reflectores de referencia internos y externos. La respuesta relativa a los reflectores internos y externos debe ser tan iguales como sea posible. La menor de las dos respuestas se utilizará como el nivel de aceptación.

Un patrón de referencia, de longitud suficiente para permitir verificación de la estandarización del sistema, se preparará de un tramo de tubería o tubería del mismo diámetro nominal y espesor de pared, material, acabado superficial y nominal tratamiento térmico como material a examinar. El tubo seleccionado para este propósito debe estar libre de discontinuidades u otras condiciones anormales que pueden causar interferencias con la detección de los reflectores de referencia [8].

2.5.1. PROCEDIMIENTO DE EXAMEN

Se mueve la tubería más allá de la unidad de búsqueda con la soldadura en una posición fija con respecto a la unidad de búsqueda. El movimiento de la unidad de búsqueda con respecto a un punto fijo de la tubería debe ser satisfactoria. Durante el examen, mantenga la distancia (d) y el ángulo en la Fig. 2.25 y la trayectoria del agua para el examen de inmersión según se determina

durante el ajuste del examen de sensibilidad. Dependiendo del grado de torcimiento del material a examinar, el mantenimiento de estos parámetros puede requerir el uso de "seguidores" u otros dispositivos para permitir que se mantenga un patrón de escaneo estable.

Ciertos sistemas de examen que utilizan búsquedas múltiples unidades o transductores de haz múltiple compensan la distancia (d) cambios que no requieren un estricto cumplimiento de las normas de mantenimiento de esta dimensión durante el examen.

Se comprueba periódicamente la sensibilidad del examen del equipo ejecutando la calibración con el estándar de referencia. Se realizan estas verificaciones antes de cualquier ensayo en tubería, antes de apagar el equipo después del examen y al menos cada cuatro horas durante el funcionamiento continuo del equipo [8].

2.5.2 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Todas las indicaciones que sean iguales o superiores a las señales de referencia establecidas durante la estandarización se deberán considerar como representación de defectos que pueden ser causa para el rechazo de la tubería o tubo.

Si al examinar la tubería o el tubo, no se detectan indicaciones rechazables, el material debe ser considerado que ha superado el examen ultrasónico [8].

2.6. NORMA 10863 DE LA ISO. USO DE LA TÉCNICA TIEMPO DE DIFRACCIÓN DE VUELO (TOFD)

Esta norma aplica la Técnica de difracción de tiempo de vuelo (TOFD) al ensayo ultrasónico semiautomático o totalmente automático de juntas soldadas por fusión en materiales metálicos de espesor mínimo 6 mm. Se aplica a

uniones soldadas de penetración completa de geometría simple en placas, tuberías y recipientes, donde ambos, la soldadura y el metal base son aceros al carbono de baja aleación. Donde se especifique y sea apropiado, TOFD también se puede utilizar en otros tipos de materiales que presenten una baja atenuación ultrasónica (especialmente la debida a la dispersión) [9].

Cuando se especifican parámetros ultrasónicos dependientes del material en esta norma internacional, se basan en aceros que tienen una velocidad del sonido de $5,920 \pm 50$ m/s para ondas longitudinales, y $3,255 \pm 30$ m/s para ondas transversales. Es necesario tener en consideración este hecho al examinar materiales con diferente velocidad.

La norma hace referencia a la norma básica EN 583-6 y proporciona orientación sobre las capacidades y limitaciones específicas de TOFD para la detección, ubicación, dimensionamiento y caracterización de discontinuidades en uniones soldadas por fusión. TOFD se puede utilizar como método independiente o en combinación con otros métodos o técnicas de ensayos no destructivos (END), para inspección de fabricación y para servicio de inspección.

Esta norma internacional especifica cuatro niveles de prueba (A, B, C y D) de acuerdo con la ISO 17635 y correspondiente a un nivel cada vez mayor de fiabilidad de la inspección. Se proporciona orientación sobre la selección de los niveles de prueba previsto [9].

Esta norma permite la evaluación de las indicaciones TOFD con fines de aceptación. Esta evaluación se basa en la evaluación de señales ultrasónicas transmitidas, reflejadas y difractadas dentro de una imagen TOFD generada.

Esta norma internacional no incluye niveles de aceptación para discontinuidades como lo hace la técnica Matriz en fase.

La técnica TOFD es una técnica de generación de imágenes ultrasónicas, que ofrece la capacidad de detección, ubicación y tamaño. Hasta cierto punto, la caracterización de discontinuidades en el material de la soldadura, así como también es posible el material parental adyacente.

En comparación con las técnicas puramente basadas en la reflexión, la técnica TOFD, que se basa en la difracción como al igual que la reflexión, es menos sensible a la orientación de la discontinuidad. Discontinuidades orientadas perpendicularmente a la superficie, y en ángulos intermedios de inclinación, son detectables, así como discontinuidades en la fusión de soldadura [9].

Para esta prueba se necesita cualificación de personal. Además de un conocimiento general de la inspección de soldaduras ultrasónicas, todo el personal debe ser competente en TOFD inspecciones. Se requiere evidencia documentada de su competencia (nivel de formación y experiencia). La preparación de las instrucciones de prueba escritas, el análisis final fuera de línea de los datos y la aceptación del informe se deben realizar por personal certificado como mínimo hasta el nivel 2 de acuerdo con la norma 9712 de la ISO o EN473 o equivalente en pruebas ultrasónicas en el sector industrial correspondiente.

Para mecanismos de escaneo se debe aplicar con la ayuda de la norma EN 583-6. Para lograr la consistencia de las imágenes (datos recopilados), se pueden utilizar mecanismos de guía.

La norma hace especificación sobre la preparación de la superficie, temperatura, tipo de acoplante, ajustes sobre la sensibilidad, proporciona información sobre los tipos de bloques de calibración (material, dimensiones y forma).

La norma detalla que la velocidad de escaneo se debe elegir para generar imágenes satisfactorias, hace énfasis en la saturación de la onda lateral o el ruido de grano excesivo, durante el escaneo se requiere acción y reexploración correctiva [9].

Las discontinuidades incrustadas se pueden clasificar en tres categorías:

- A) Discontinuidad puntual: Este tipo aparece como una única curva de forma hiperbólica que se puede encontrar a cualquier profundidad.
- B) Discontinuidad alargada sin altura medible: Este tipo aparece como un patrón alargado correspondiente a una señal de borde superior aparente.

- C) Discontinuidad alargada con una altura medible: Este tipo aparece como dos patrones alargados ubicados en diferentes posiciones en profundidad, correspondientes a la parte inferior y bordes superiores de la discontinuidad. La indicación TOFD del borde inferior suele estar en fase con la onda lateral. La indicación TOFD del borde superior suele estar en fase con la reflexión de la pared posterior [9].

2.7. PROPUESTA DE NORMA A609 DE LA ASTM

La práctica cubre los estándares y procedimientos para el examen ultrasónico de pulso-eco de piezas fundidas de acero inoxidable martensítico, de baja aleación y carbono tratado térmicamente mediante la técnica de haz longitudinal.

Esta práctica contiene dos procedimientos para ultrasonidos: el procedimiento A (inspección de acero inoxidable al carbono de baja aleación) y el procedimiento B (fundición martensítica de acero). El procedimiento A requiere calibración utilizando una serie de bloques de prueba que contienen orificios de fondo plano, proporciona requisitos adicionales para pruebas de haz angular. El procedimiento B requiere calibración usando un reflejo de la pared trasera de una serie de bloques sólidos de calibración [10].

Cuando se aplica el procedimiento A sobre la calibración de agujeros de fondo plano se deberá proporcionar la siguiente información:

- ✓ Niveles de calidad para la fundición entera o porciones de ella;
- ✓ Secciones de piezas fundidas que requieren un examen de haz longitudinal;
- ✓ Secciones de piezas fundidas que requieren un examen de elementos duales; y
- ✓ Secciones de piezas fundidas que requieren un examen complementario, utilizando el procedimiento de haz en ángulo descrito en el Requisito complementario S1 para lograr un examen más completo.

El procedimiento de la prueba B, consiste en la calibración de la reflexión de la pared trasera, quien la aplique deberá designar los niveles de calidad para la fundición completa o las partes correspondientes [10].

Se debe hacer un mayor estudio (estudio a profundidad) de la norma para conocer los requisitos del aparato ultrasónico; calibración, dimensiones y capacidad de las unidades de búsqueda, de elemento dual y angulares; dimensiones, y tipo de material de los bloques de calibración. La norma, proporciona toda la información que se debe conocer sobre la aplicación de la práctica para los dos procedimientos de prueba que se mencionan. Describe los requisitos que debe cumplir el personal a realizar la práctica, terminología, conceptos a dominar sobre el ensayo siempre de la mano de la norma SNT-TC-1A.

Se describe un procedimiento a seguir y aplicar para cada procedimiento de prueba (A o B) se describe un proceso de escaneo, la preparación de la pieza a examinar incluyendo el acabado superficial, se especifica criterios de aceptación como se veía en la norma D1.1 añade lo que debe contener el informe de la prueba, todo lo necesario para realizar correctamente el ensayo ultrasónico [10].

2.8. ASPECTOS BÁSICOS PARA LA CERTIFICACIÓN DE PERSONAL

Es necesario para la realización de ensayos no destructivos por ultrasonido, contar con 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 por el código SNT-TC-1A el cual es nombrado como “Cualificación y certificación del personal en ensayos no destructivos”. Este documento establece tres niveles diferentes de cualificación, cada uno con más deberes y responsabilidades que el anterior. Pasar de un nivel a otro se basa en una combinación de educación, experiencia, capacitación y aprobación

de exámenes de calificación. El personal de cada uno de los tres niveles tiende a requerir recertificación cada cinco años, así [11]:

- a) Personal "Nivel I" debe estar preparado para realizar calibración de equipos, exámenes y evaluaciones específicas con instrucciones escritas específicas.
- b) Personal "Nivel II" los profesionales adquieren más deberes y responsabilidades, están calificados para calibrar equipos, interpretar y evaluar los resultados con respecto a códigos y especificaciones. Entre sus obligaciones están: preparar instrucciones escritas, capacitar personal laboral e informar de los resultados de los ensayos.
- c) Profesionales "Nivel III" deben ser capaces de establecer técnicas, interpretar códigos y diseñar métodos y técnicas de ensayo que deban utilizarse. También pueden capacitar y examinar técnicos de Nivel I y II para su certificación.

Al desarrollar tanto la estrategia general, como los planes detallados por sesión, para la capacitación de personal dedicado al ultrasonido industrial, con base en los objetivos determinados (en apego a la práctica recomendada anteriormente), es esencial seleccionar una estructura y una metodología que tengan la mayor efectividad para el ambiente en que se realice la capacitación, tomando en consideración factores tales como:

- a) La escolaridad del personal. A pesar de ser un requisito indispensable en la aplicación de alguna técnica, no es estrictamente necesario, debido a que el personal puede cubrir este aspecto con horas de práctica en campo. El documento SNT-TC-1A, proporciona la Tabla 2.14 en la cual se establece las horas de capacitación en base a la escolaridad. Para ultrasonido es recomendable tomar una capacitación intensiva, de por lo menos 40 h.
- b) La disposición de recursos para la capacitación. En las horas de práctica se considera como punto indispensable de equipos de inspección, piezas de prueba y material didáctico para una capacitación completa e integral.
- c) La persona que aplique debe contar tiempo disponible, considerando que el mínimo de horas recomendadas para completar una capacitación es de 40,

por lo que el personal debe estar libre de cualquier otra actividad durante la impartición de la capacitación [11].

Tabla. 2.14. Demostración de horas prácticas y entrenamiento para ser técnico en pruebas ultrasónicas.

Método de examinación	Nivel en END	Técnica	Entrenamiento, h	Experiencia	
				Mínima, h	Totales en END, h
Prueba ultrasónica	I	Prueba convencional por contacto manual	40	210	400
	II		40	630	1,200
	II	Captura de matriz completa	80	320	n/a
	II	Arreglo de fases (Phased array)	80	320	n/a
	II	Tiempo de difracción de vuelo (TOFD)	40	320	n/a

d) Como material didáctico es necesaria la utilización de un manual con información necesaria sobre la técnica y material visual utilizado durante la capacitación.

El enfoque que deberá tener la capacitación será de transmitir las habilidades (de un nivel II a un nivel I) y realizar las tareas pertinentes, para llevar a cabo inspecciones adecuadamente con integridad bajo presión y no sólo con aspectos básicos. Las metodologías adecuadas derivan de este principio básico.

Es aceptado que el aprendizaje que se basa en el estudio de un manual, no genera tan buenos resultados como el que está basado en la realización de prácticas, en sesiones de capacitación. Por lo tanto, los programas de capacitación para los técnicos en ultrasonido deben ser presenciales, que conste de teoría básica y prácticas de inspección.

En casos especiales donde la distancia es el impedimento para capacitarse existe la alternativa de cursos y examinación en línea; para las personas que el costo de la capacitación es el impedimento, al menos deberán recibir un material y documentos para la autocapacitación y se puedan someter a un examen a futuro, esto es lo que recomienda la práctica SNT-TC-1A [11].

2.8.1. CUESTIONES ESPECÍFICAS

Para determinar la estructura y la metodología de la capacitación, existe una cantidad de cuestiones interrelacionadas que requiere solución:

- a) ¿Cuál será la mejor estructura para el programa de capacitación? Para esto deberá recurrir al temario de la técnica por ultrasonido, contenido en el documento SNT-TC-1A.
- b) ¿A quién se deberá recurrir para impartir la capacitación a técnicos en ultrasonido y qué necesitaría para llevar a cabo una presentación exitosa? En El Salvador sólo existe un organismo certificador en pruebas no destructivas, esta avala la adecuada capacitación del personal, también existen compañías o empresas extranjeras que capacitan, estas se basan en el documento SNT-TC-1A, estas extienden un comprobante de las horas de capacitadas, esto con fines de certificación posterior.
- c) ¿Qué instalaciones y recursos adicionales se necesitarán? Las empresas suelen capacitar a su personal, contratando servicios de otras empresas, las cuales brindan sus propias instalaciones para este fin. Por otra parte, también es común que se contrate al personal que imparte capacitación, para que asista a las instalaciones de la empresa interesada.
- d) ¿Cómo se medirán los resultados de la capacitación? Para este aspecto la práctica contempla la realización de tres exámenes, un examen específico, un examen general y un examen práctico. La evaluación del personal se debe apegar a los requerimientos mínimos de calificación, los cuales son de 70% como calificación mínima, pero con un promedio general de 80% para poder acreditar un curso de capacitación en ultrasonido.

3. PROPUESTA DE ENSAYOS

Aunque es muy amplio el área relacionada con las especificaciones y los estándares a cumplir para realizar ensayos no destructivos (END), este trabajo sólo tiene como interés la evaluación de materiales metálicos mediante inspecciones internas en las cuales se determinen espesores y analizar defectos internos como en juntas soldadas, en piezas obtenidas por fundición, maquinado, o con tratamientos térmicos, entre otras, utilizando equipos ultrasónicos de muy buena calidad. Así, el fin es sentar las bases de una propuesta de ensayos a utilizar en los laboratorios de esta Escuela de Ingeniería Mecánica.

3.1. GENERALIDADES

A continuación, se presenta una breve descripción sobre la norma E797 de la ASTM y el código D1.1 de la AWS, las cuales son las bases para fundamentar esta propuesta de normativas, en la cual se contemplarán otras aplicaciones, así:

A) Estudio de la normativa E797 de la ASTM publicada oficialmente en el año 2015, la cual provee pautas para la medición de espesores de materiales en servicio utilizando el método pulso-eco por contacto manual teniendo en consideración que el material a inspeccionar no presente temperaturas por arriba de los 93 °C. La normativa explica las consideraciones que se deben de tomar para hacer el uso correcto del equipo y de los dispositivos ultrasónicos, poniendo a punto el equipo como detector de espesores aplicando el principio mecánico de pulso-eco.

Se hace a bien recordar que los dispositivos como los transductores y cable coaxial a utilizar para aplicar esta normativa, tienen que ser especialmente diseñado para resistir las temperaturas de servicio.

La normativa se eligió a bien tomarla como guía didáctica ya que es fácil ponerla en práctica y tenerla a disposición para ensayos que se deban

realizar en esta Escuela. Por consiguiente, tal vez para los estudiantes no sea tan necesario realizar prácticas de laboratorios de elementos con alta temperatura, pero cabe la posibilidad que para estudios más formales se tenga que aplicar dicho reglamento, teniendo presente que para tal ensayo son necesarios palpadores especiales.

- B) La segunda normativa que se presentó fue el código D1.1 de la AWS reconocida y publicada oficialmente en diciembre de 2019. La sección 8 de este código está dedicada a la inspección y la parte F de esta sección es aplicada a pruebas por ultrasonido a soldaduras. Este código cuenta con temas como: “Criterios de aceptación”, el cual consiste en el criterio propio del inspector utilizando el método y procedimiento presentado en la normativa, de igual forma se debe tener a buen juicio la interpretación de lecturas e imágenes sobre imperfecciones y discontinuidades detectadas por el equipo ultrasónico, se obtendrán criterios de aceptación o rechazo dependiendo de la clase de severidad de la discontinuidad que se haya analizado. Del mismo modo se presenta el tema de “Procedimientos de ensayos”, los cuales se han utilizado durante años y proporcionan una garantía razonable de los ensayos ultrasónicos.

El código se ha puesto a estudio para la evaluación de soldaduras a tope, en la detección de discontinuidades como fisuras, poros, falta de fusión, socavación, etc. Este código incluye ciertos requisitos y reglas como calificación de equipos, calificación de personal y métodos operativos que conllevan a una inspección ultrasónica, todo lo especificado anteriormente se detalla de forma clara y concisa en la sección 8 parte F del presente código.

Respecto a los requisitos sobre calificación del operario, estos consisten en: un examen específico y otro práctico, estos deben estar regidos bajo el mismo código, esto con el fin de que el operario demuestre la capacidad para aplicar las reglas de detección y disposición de discontinuidades.

Además, el código cuenta con la sección de la elaboración de informes, en donde se debe indicar claramente el trabajo realizado, el bosquejo del área

de inspección, el detalle de la imperfección, razones del por qué se rechaza o se acepta el componente, firmas del inspector y del ente regulador, organización o institución responsable de haber realizado los ensayos. Y finalmente, estos informes deberán ser entregados al respectivo propietario.

3.2. EQUIPOS Y ACCESORIOS NECESARIOS

El equipo como tal que se tiene que utilizar tiene que disponer de la función de detector de fallas con pantalla A-scan, y que tenga la función de lectura directa del espesor.

Además, se debe de disponer de accesorios para realizar el ensayo, los cuales se detallan a continuación:

- Transductor de alto desgaste por contacto de un solo elemento de 2.25 MHz y 12.7 mm (1/2 pulg), amortiguación media.
- Transductor compuesto de alto desgaste por contacto de elemento único, 3.5 MHz 19 mm (3/4 pulg), amortiguación media [12].
- Transductor de onda transversal estándar de 19 x 19 mm (3/4 x 3/4 pulg) de 5 MHz, alta ganancia [12].
- Mini Transductores de haz angular de 45 grados, 2.25 MHz, medida de 6.35 mm (1/4 pulg) [12].
- Mini Transductor de haz angular de 60 grados, 5 MHz, medida de 9.5 mm (3/8 pulg) [12].
- Mini Transductor de haz angular de 70 grados, 10 MHz, medida 4.8 mm (3/16 pulg) [12].
- Cable coaxial para conexión y transferencia de datos entre el equipo y el palpador;
- Acoplante como glicerina, gel o acoplante de alta temperatura;
- Bloque de calibración de 8 pasos, aluminio, acero, acero inoxidable y titanio de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 mm [12];
- Bloque de calibración de 10 pasos, aluminio, acero, acero inoxidable y titanio de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 y 20 mm [12];

- Bloque de calibración de 10 pasos, aluminio, acero, acero inoxidable y titanio de 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5 y 25 mm [12]; y
- Bloques para calibración Tipo II W, bloque de Resolución y según sea la aplicación.

3.3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

La preparación de la superficie que se inspeccionará en la muestra consiste en una correcta limpieza, así primeramente se deben de remover salpicaduras de soldadura, suciedad, pintura, grasa como recubrimiento de aceite, pequeñas escamas metálicas adheridas, corrosión, oxidación, entre otras. Luego, se debe preparar la zona de barrido lijando con lijas de carburo de silicio granos 40, 50 o 60, además si se requiere una superficie con un excelente acabado superficial se deberá utilizar lijas de carburo de silicio hasta grano 220. Esto es debido a que el acabado superficial incide directamente en la lectura del haz ultrasónico.

3.4. METODOLOGÍA

En la metodología se espera aplicar los procedimientos para la realización de los ensayos ultrasónicos, se plantean procedimientos para la medición de espesores y para la determinación de imperfecciones presentes en las muestras soldadas a tope, teniendo en cuenta las reglas y requisitos vistos en las normativas estudiadas en el capítulo anterior.

3.4.1. DETERMINACIÓN DE ESPESORES SUPERFICIES PLANAS

La metodología a utilizar para la medición de espesores es la siguiente:

- A) Selección del tipo de transductor [12].
- B) Realizar las conexiones para la identificación del transductor.

- C) Realizar la medición en el bloque de calibración tipo escalera o cilíndricos según se tenga a disposición.
- D) Realizar el ajuste respectivo al transductor: se debe hacer un ajuste a cero por lo que se debe limpiar completamente el área de acoplamiento del transductor y bloque, así:
 - a) Setear a cero el equipo;
 - b) Introducir en el equipo el valor de referencia al cual se quiere llevar;
 - c) Colocar acoplante sobre el bloque de referencia que se ajustará y colocar el transductor;
 - d) El equipo hará la adquisición del dato y pedirá que se remueva el transductor; y finalmente
 - e) Colocarlo de nuevo para corroborar que se ha ajustado correctamente.
- E) En el caso que se requiera medir espesor en superficies calientes primero se deberá medir la temperatura del área de inspección para realizar la calibración.
- F) Y finalmente, realizar la medición del espesor colocando el transductor en el elemento a inspeccionar.

3.4.2. DETERMINACIÓN DE DISCONTINUIDADES EN SOLDADURAS A TOPE

El método a usar para la inspección de imperfecciones en soldadura es el siguiente:

- A) Identificar el tipo de soldadura.
- B) Identificar la aplicación de la soldadura, el ángulo de prueba, junto con el espesor del material a inspeccionar especificado en tablas.
- C) Aplicar calibración de la distancia, sensibilidad del transductor, ángulo con bloque de referencia tipo IIW y bloque de resolución según se requiera.
- D) Determinar distancias como, distancia de salto y de medio salto, esto para delimitar zona de inspección.

- E) Realizar la inspección de cada lado del eje de soldadura aplicando patrones de escaneo y movimientos de barrido según determine conveniente.
- F) Determinar por medio de cálculos matemáticos trayectoria en V, distancia angular, factores como nivel de indicación, nivel de referencia, factor de atenuación con lo cual se determina la clasificación de la indicación o se puede determinar fácilmente con la ayuda del equipo.
- G) Finalmente, por medio de tablas determinar si se acepta la discontinuidad o se rechaza dependiendo de la clase de severidad de la discontinuidad.

3.5. REGISTRO DE LA INFORMACIÓN

El registro de la información en el equipo elcometer fd800 (ver, Fig. 3.1) consiste en un registro de los datos tomados en cada ensayo, mientras se toman medidas, los datos se almacenan en archivos colocados en la memoria del equipo para una posterior revisión. Además, los datos de medición se pueden transferir a una computadora.

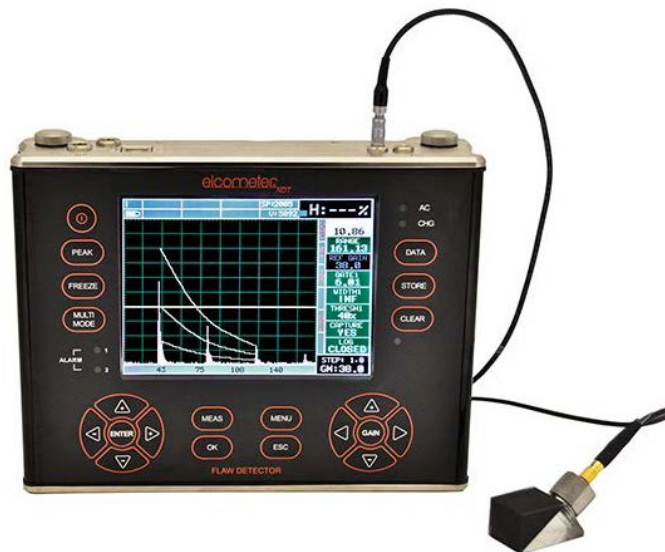


Fig. 3.1. Equipo elcometer fd800dl.

A continuación, se describe la información en cada pantalla para lectura de espesores y detección de fallas.

3.5.1. PANTALLA RF A-SCAN

La vista RF A-Scan es una representación gráfica de los reflejos de sonido que regresan al transductor (similar a las señales de un osciloscopio). La pantalla de forma de onda presenta la amplitud de la señal recibida en el eje vertical (eje y) y el tiempo (presentado en unidades de espesor) en el eje horizontal (eje x), tal como se presenta en la Fig. 3.2a.

La forma de onda de RF incluye tanto los picos positivos como también los negativos. El punto de detección se presenta en la forma de onda.

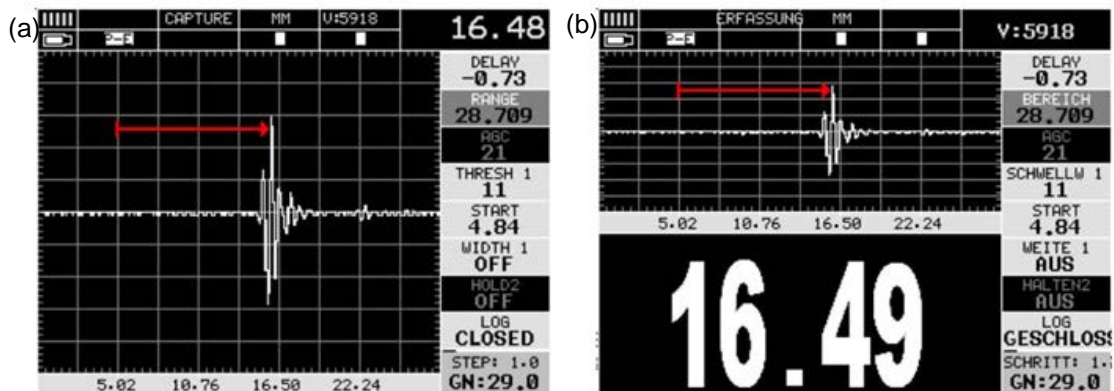


Fig. 3.2. Pantalla A-SCAN: (a) Pantalla completa, sólo onda; y (b) ½ Pantalla de onda, ½ pantalla de dígitos.

El punto del escaneo que se está utilizando para calcular la lectura de espesor digital se presenta como la línea de puntos verticales. En resumidas cuentas, la pantalla de RF se utiliza para configurar el medidor antes de la inspección [12].

3.5.2. PANTALLA MEDICIÓN DE ESPESOR RECT A-SCAN

La vista +RECT es similar a la pantalla de RF pero presenta sólo la mitad positiva de la forma de onda (ver, Fig. 3.3a). El punto de detección se indica en la forma de onda [12].

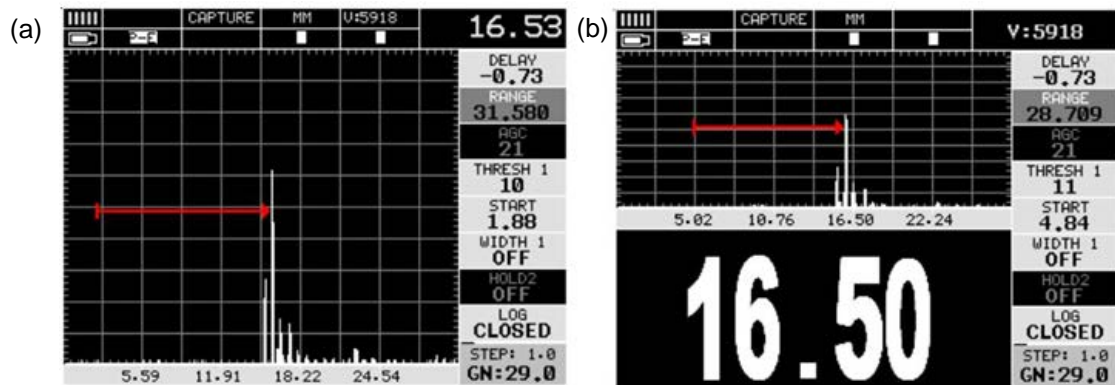


Fig. 3.3. Pantalla A-SCAN RECT: (a) Pantalla completa, sólo onda; y (b) ½ Pantalla de onda, ½ pantalla de dígitos.

3.5.3. PANTALLA MEDICIÓN DE ESPESOR B-SCAN

La pantalla B-Scan (ver, Fig. 3.4) basada en el tiempo proporciona una vista en sección transversal del material que se está probando. Este modo se utiliza cuando se necesita inspeccionar el perfil de la superficie ciega. También puede ser una vista útil en el instante de la búsqueda de grietas y fallas.

La pantalla B-Scan está equipada con una barra de escaneo que representa el grosor total. La barra de escaneo le da al usuario una indicación visual cuando se pasó un defecto durante el proceso de escaneo.

Un ejemplo es si está inspeccionando una tubería y pasa sobre un pozo durante el proceso, la barra de escaneo se desviará rápidamente y lo alertará para que regrese en busca del defecto [12].

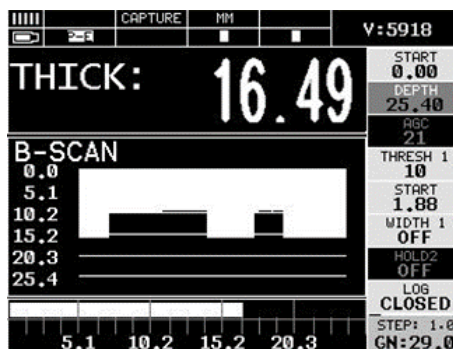


Fig. 3.4. Pantalla B-SCAN. Imagen transversal de la pared y espesor del material.

3.5.4. PANTALLAS DE DETECCIÓN DE FALLAS

El equipo también tiene el ajuste de convertirse en un detector de fallas con la capacidad de detectar el tamaño y la posición de las discontinuidades y de diferenciar entre tipos de fallas en varios materiales y uniones soldadas.

El detector tiene cuatro tipos de pantalla de medición (ver, Fig. 3.5):

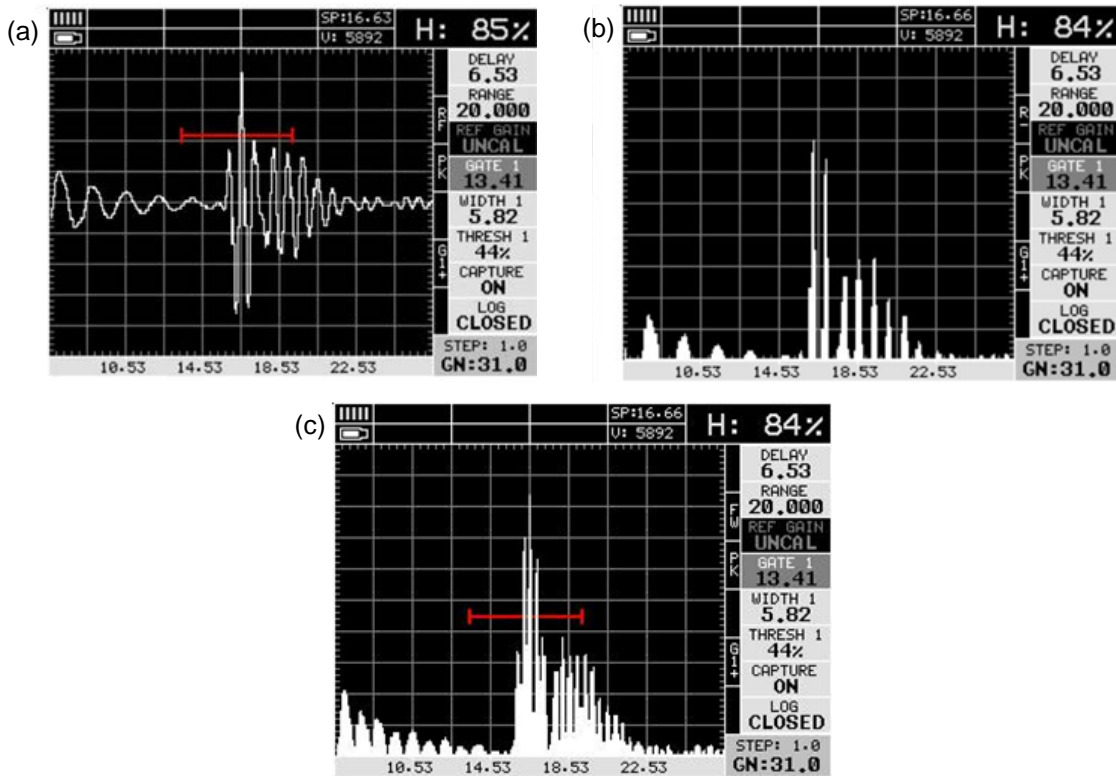


Fig. 3.5. Tipos de pantalla del detector de defectos: (a) RF; (b) + RECT; y (c) RECTFW

➤ Pantalla de detección RF

La vista RF (ver, Fig. 3.5a) presenta una representación gráfica (similar a la traza de un osciloscopio) de los reflejos de sonido que regresan al transductor. La pantalla de forma de onda presenta la amplitud de la señal recibida en el eje vertical (eje y) y el tiempo (presentado en unidades de espesor) en el eje horizontal (eje x). La forma de onda de RF incluye tanto los picos positivos como los negativos [12].

El punto de detección se presenta en la forma de onda. La vista de forma de onda de RF se utiliza normalmente para ajustar el medidor antes de realizar una inspección.

➤ Pantalla de detección “+ RECT”

La vista + RECT (ver, Fig. 3.5b) es similar a la pantalla de RF pero presenta solo la mitad positiva de la forma de onda. El punto de detección se indica en la forma de onda [12].

➤ Pantalla de detección “– RECT”

La vista -RECT es la misma que la vista +RECT pero presenta sólo la mitad negativa de la forma de onda.

➤ Pantalla de detección RECTFW

La vista RECTFW (ver, Fig. 3.5c) presenta la señal de onda sinusoidal completa en una vista rectificada. No hay polaridad línea de retardo.

3.5.5. PANTALLA MODO AWS

En la Fig. 3.6a se presenta un resultado usando el modo AWS, la Fig. 3.6b indica cómo se vería la pantalla del equipo para la respectiva calibración de la ganancia corregida del tiempo (TCG) y la Fig. 3.6c presenta cómo se vería si se aplica una corrección de amplitud de distancia (DAC) [12].

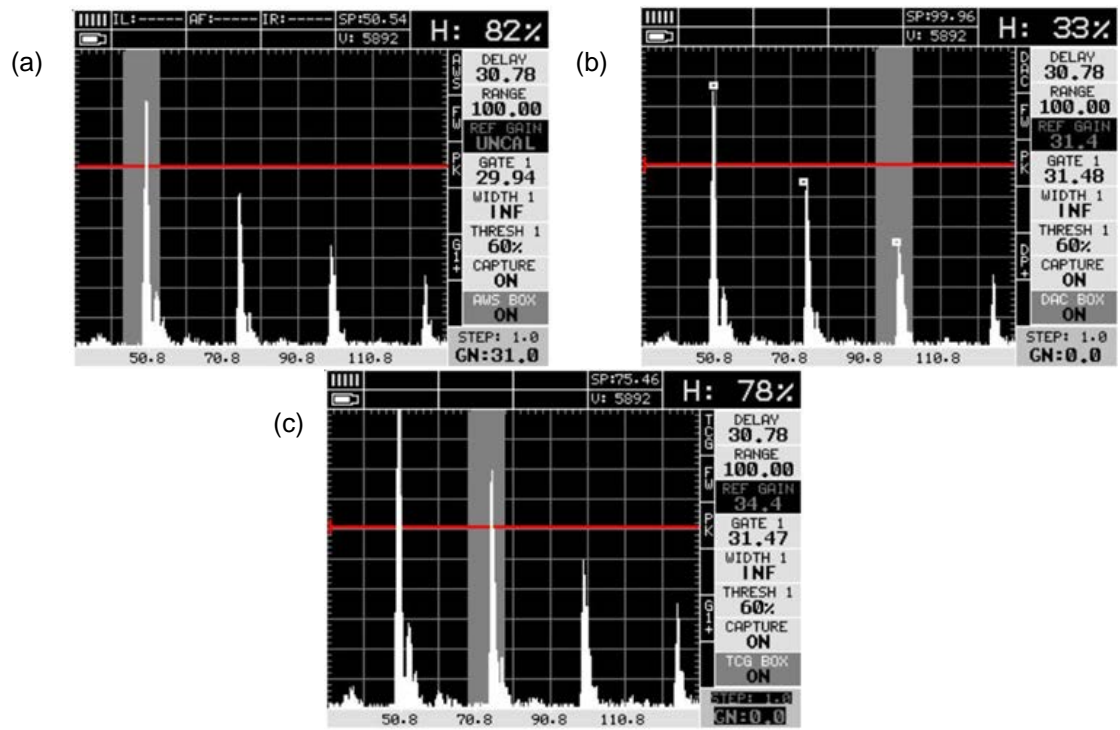


Fig. 3.6. Demostración de: (a) Uso AWS; (b) Curva TCG; y (c) Curva DAC.

CONCLUSIONES

- Los conceptos teóricos que se presenta sirven de base fundamental para el entendimiento de los ensayos no destructivos analizando los métodos y las técnicas al usar equipos ultrasónicos, de esta manera y abonando a los estudios investigativos de END es como se contribuye a que personas, practicantes o estudiantes con conocimiento básico sobre las técnicas, se vean interesados(as) a realizar tan interesantes prácticas, del mismo modo se sientan impulsados(as) a incursionar en esta tan importante especialidad.
- La normativa E797 de la ASTM, hace el enfoque a la medición de espesores tanto con palpadores de haz recto como con palpadores duales de una manera explícita y bastante entendible para la persona que decida ponerla en práctica, sin embargo tiene su grado de dificultad darle secuencia a los métodos, pero esto solo depende de que tan complejo puede ser el equipo ultrasónico que se tenga disponible para tales ensayos ya que, para elementos con geometría poco comunes son necesarios accesorios especiales y es normal que se complique un poco más el procedimiento de ensayo, además el practicante debe tener un concepto más amplio sobre los requisitos y reglas de la técnica.
- El documento D1.1 (2020) de la AWS sección 8, parte F, es aplicable con el equipo adquirido por la escuela, además el manual de dicho equipo recomienda el uso de esa normativa.
- La norma 13588 de la ISO, solamente se puede aplicar con equipos especializados para realizar la técnica de matriz en fase (phased array), no obstante, se tomó como estudio para fines didácticos en conceptos informativos de abarcar más estándares en ensayos por ultrasonido.

- El procedimiento descrito en el tercer capítulo es fundamental para llevar a cabo las pruebas en laboratorios ya que se busca que sea un procedimiento unificado y que sea un estándar a seguir en futuros ensayos utilizando el equipo adquirido por la escuela.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BARRERA SUÁREZ, L. (4 de abril de 2011). Desarrollo y procedimientos para la utilización de técnicas de ensayos no destructivos con ultrasonido para inspección de tuberías. Obtenido de http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital_21062.pdf
- [2] López Lina, G. (enero de 2009). La inspección y evaluación no destructiva por el método de ultrasonido, en materiales y componentes, para el mantenimiento, la seguridad y la sustentabilidad de la infraestructura industrial. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/5033/147.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [3] PARADA, M. E. (2010). Propuesta de un laboratorio de ensayos no destructivos para la Escuela de Ingeniería Mecánica. Ciudad Universitaria.
- [4] Romero Reyes, B. J., & Probeste Contreras, F. H. (2013). Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura. Chile: Universidad del Bío-Bío. Sistemas de Bibliotecas.
- [5] ASTM E797-15 (21 de Julio de 2016). Scribd. Obtenido de Standard Practice for, Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo, Contact Method: <https://es.scribd.com/doc/292927986/9SE-797-ASTM-E-797-05>
- [6] AWS D1.1 2020 (9 de diciembre de 2019). DocerArgentina. Obtenido de <https://docer.com.ar/doc/xes0ev5>
- [7] ISO 13588, I. S. (05 de septiembre de 2012). AFNOR. Obtenido de Non-destructive testing of welds - Ultrasonic testing - Use of automated phased array technology: <https://www.sis.se/api/document/preview/80009856/>
- [8] ASTM E273 – 15. (2015), KUPDF. Obtenido de https://kupdf.net/download/e-273-15_5a69dbdce2b6f5bf362ce8b1_pdf
- [9] ISO 10863 (18 de Abril de 2020). AFNOR. Non-destructive testing of welds - Ultrasonic testing - Use of time-of - flight diffraction technique (TOFD). Obtenido de: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/75443/8417f98064df4f0688018d064cb8620/ISO-10863-2020.pdf>

- [10] ASTM A 609/A 609M. (1997). ACADEMIA. Obtenido de https://www.academia.edu/39348793/A609_PDF
- [11] ASNT SNT-TC-1A. (2020). SCRIBD. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/491171251/ASNT-SNT-TC-1A-2020-By-William-Mendoza-en-espanol>
- [12] Elcometer. (2020). DOCPLAYER. Obtenido de Transductores de detección de fallas: <http://docplayer.es/213224866-Transductores-de-deteccion-de-fallas-elcometerndt-com-1.html>

ANEXOS

Algunas marcas reconocidas de equipos para END por medio de ultrasonido son las siguientes:

- Olympus
- GE (General Electric)
- Sonatest
- MX-FX
- Elcometer
- SyncScan
- EVTECH
- Doppler

Equipos ultrasónicos para diferentes técnicas de ultrasonido:



Características:

Marca: GE

Modelo: USM35

Método: Convencional

Acreditación: EMA

Trazabilidad: CENAM

Fig. A.1. Equipo para ultrasonido convencional



Características:

- Marca: Olympus
- Modelo: EPOCH 600
- Método: Convencional
- Acreditación: EMA
- Trazabilidad: CENAM

Fig. A.2. Detector de defectos por Ultrasonido convencional



Especificaciones:

- ✓ Resultados rápidos y precisos
- ✓ Configuraciones estándar Wedge Delay, TGC, DAC, TOFD y calibración de encóder
- ✓ Ajustes instantáneos de leyes focales con resolución angular de 0.1°
- ✓ Control remoto a través de conexión de red
- ✓ Aplicación de software UT Studio
- ✓ Sondas adicionales.

Fig. A.3. Sonatest VEO, Detector de defectos Matriz en Fase.

Características del equipo Sonatest VEO:

- ✓ Inspección de soldadura de alta resolución
- ✓ Inspección de soldadura estándar
- ✓ Inspección rápida de materiales compuestos
- ✓ Inspección de soldadura gruesa (S-Scan y L-Scan)

- ✓ Corrosión mapping
- ✓ Composite mapping
- ✓ Inspección de geometrías complejas
- ✓ Elevada penetración
- ✓ Apto para aleaciones especiales
- ✓ Aplicaciones multi-scan.



Fig. A.4. Detector de fallas portátil

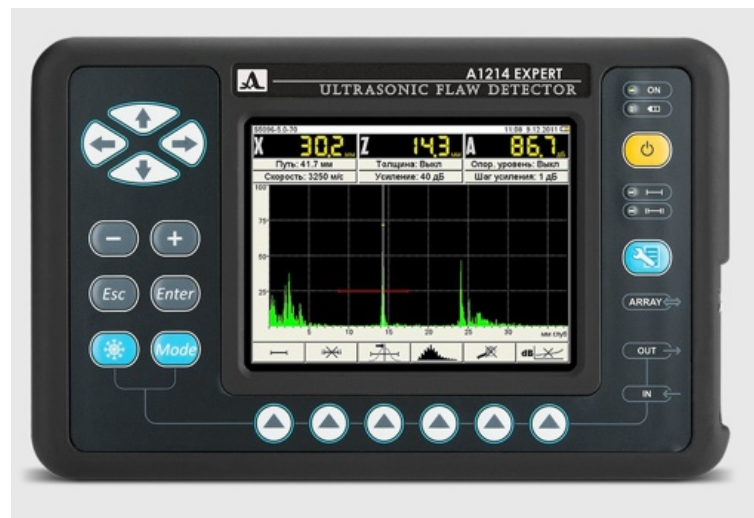


Fig. A.5. Experto detector de fallas ultrasónico



Fig. A.6. Detector de fallas (Flexscan) para matriz en fase.



Fig. A.7. Detector de fallas, para las técnicas: Matriz en fase, TOFD y FMC / TFM