

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA



“ENSAYO DE ULTRASONIDO APLICADO EN EL CONTROL DE CALIDAD DE ESTRUCTURAS SOLDADAS SEGÚN EL CODIGO AWS D1.1 /D1.1M:2010”

**INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO METALURGISTA**

ELABORADO POR:
FRANZ ZEVALLOS BUSTAMANTE

ASESOR:
ING. JULIO UZA TERUYA

LIMA – PERÚ
2013

DEDICATORIA:

Este trabajo se lo dedico a mi familia,
amigos y maestros, quienes me brindaron
su apoyo a lo largo de mi carrera.

RESUMEN

En este informe de suficiencia se presenta el estudio del ensayo no destructivo de ultrasonido, en donde se detalla inicialmente el principio físico por el que se rige, así como también los instrumentos necesarios para que este ensayo pueda ser aplicado eficazmente. Luego se dará a conocer en forma más detallada la aplicación del ensayo de ultrasonido mediante la técnica pulso – eco, en la inspección de juntas soldadas a tope con penetración completa para la fabricación de estructuras metálicas. La aplicación descrita se basa en un procedimiento de ensayo que cumple con los requerimientos de inspección del código AWS D1.1 /D1.1M:2010. Dicho procedimiento es aplicable para la inspección con ultrasonido en juntas soldadas de canal de componentes no tubulares de espesores comprendidos entre 8 y 200 mm.

Finalmente se detalla, los requisitos básicos que deben cumplir el equipo y personal que aplica este ensayo, así como también las ventajas y limitaciones al aplicar este ensayo que es muy importante en el control de calidad de las estructuras soldadas.

ABSTRACT

In this report of proficiency, the ultrasonic non destructive method of analysis is described, outlining at first the basic principles of this method. Then it is presented in some more details the technique pulse – echo, inspection of butt welded joints with complete penetration for the manufacture of metal structures. For such an application we will base on a procedure of test which fit with the requirements of inspection of the code AWS D1.1/D1.1M:2010. Such a method is applicable for ultrasound inspection channel welded joints tubular components thicknesses between 8 and 200 mm.

Finally some basic requirements are given to be met by equipment and personnel applying this test, as well as the advantages and limitations in applying this test are very important in quality control welded structures.

INDICE

INTRODUCCION	9
---------------------------	----------

CAPITULO I: FUNDAMENTO TEORICO

1.1 Antecedentes históricos	10
1.2 Principio físico de las ondas ultrasónicas	13
1.3 Parámetros de las ondas ultrasónicas	15
1.4 Tipos de ondas ultrasónicas	16
1.5 Características de propagación de las ondas ultrasónicas	19
1.6 Efectos de la interfase acústica	23
1.7 Mecanismos de atenuación	32
1.8 Principios del ensayo de ultrasonido	34
1.8.1 Modo de generación de ondas ultrasónicas	34
1.8.2 Clasificación de los transductores	37
1.8.3 Características de los transductores	39
1.8.4 Selección de los transductores	41
1.9 El haz ultrasónico	44
1.10 Método de prueba y técnica de inspección	48
1.11 El aparato de ultrasonido	51
1.12 Uso de los transductores de haz angular	54
1.13 Inspección de soldaduras por ultrasonido	61

CAPITULO II: PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE ULTRASONIDO

2.1	Requerimientos generales.....	63
2.2	Calibración del equipo de ultrasonido.....	65
2.2.1	Calibración para el ensayo con haz normal	65
2.2.2	Calibración para el ensayo con haz angular.....	66
2.3	Técnica operacional del ensayo	69

CAPITULO III: APLICACIÓN DEL ENSAYO DE ULTRASONIDO

3.1	Inspección del material base.....	77
3.2	Inspección de juntas soldadas a tope.....	79
3.3	Aplicación del ensayo de ultrasonido, utilizando el equipo USM Go.....	91

CONCLUSIONES	101
---------------------------	-----

BIBLIOGRAFIA	102
---------------------------	-----

ANEXOS	103
---------------------	-----

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: El espectro acústico	13
Figura 1.2: Las Ondas longitudinales	17
Figura 1.3: Las Ondas transversales	18
Figura 1.4: Incidencia normal	24
Figura 1.5: Valores de la presión acústica, en el caso de reflexión, en una superficie limite acero – agua.....	27
Figura 1.6: Incidencia angular.....	28
Figura 1.7: Conversión de modos.....	29
Figura 1.8: Partes de un transductor	35
Figura 1.9: Transductores de haz recto.....	37
Figura 1.10: Transductores de haz angular	38
Figura 1.11: Poder de resolución de un transductor	39
Figura 1.12: Zonas del haz ultrasónico	44
Figura 1.13: Campo cercano y lejano de un generador de ultrasonidos	47
Figura 1.14: Método de contacto con incidencia normal	48
Figura 1.15: Método de contacto con incidencia angular	49
Figura 1.16: Representación A- scan.....	53
Figura 1.17: Propagación del haz de ondas de corte	54
Figura 1.18.: Pantalla del instrumento ultrasónico	55
Figura 1.19: Incidencia del haz angular en el borde de la placa	56
Figura 1.20: Distancia SD y SD/2	57
Figura 1.21: Distancia de medio salto	58
Figura 1.22: Detección de una discontinuidad	59
Figura 1.23: Detección de una discontinuidad con la segunda pierna.....	60
Figura 2.1: Posiciones del transductor para realizar la calibración del equipo ...	68
Figura 3.1: Ensayo de ultrasonido con haz normal para descarte de laminación	78
Figura 3.2: Inspección de una unión a tope con transductor de haz angular	80

Figura 3.3: Zona de barrido.....	82
Figura 3.4: Patrones de barrido	83
Figura 3.5: Modo de barrido para la identificación de porosidad	86
Figura 3.6: Representación de la porosidad en la pantalla del equipo	87
Figura 3.7: Detección e identificación de escoria	88
Figura 3.8: Representación de la escoria en la pantalla del equipo.....	88
Figura 3.9: Detección e identificación de grietas de fabricación	89
Figura 3.10: Representación de grieta de fabricación, en la pantalla del equipo	90
Figura 3.11: Equipo USM Go, Patrón IIW, cable coaxial, transductor y acoplante.....	92
Figura 3.12: Dimensiones del patrón de calibración del IIW	92
Figura 3.13: Ajustes del equipo USM Go, antes de la calibración.	93
Figura 3.14: Determinación del punto de salida del haz ultrasónico.	94
Figura 3.15: Determinación del ángulo de refracción del transductor... ..	95
Figura 3.16: Calibración en distancia	96
Figura 3.17: Pantalla del equipo en la calibración en distancia.	97
Figura 3.18: Ajuste de la sensibilidad.....	98
Figura 3.19: Aplicación del ensayo de ultrasonido con el equipo USM Go.....	99
Figura 3.20: Datos registrados en el equipo al captar una discontinuidad.....	100

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Velocidad longitudinal y transversal.....	21
Tabla 1.2: Materiales piezoeléctricos y sus propiedades	36
Tabla 2.1: Equipos de ultrasonido	64
Tabla 2.2: Transductores de haz normal y angular.....	64
Tabla 2.3: Incremento de sensibilidad para componentes no tubulares sometidos a carga estática (extraída de la Tabla 6.2 del código AWS D1.1-2010).....	70
Tabla 2.4: Incremento de sensibilidad para componentes no tubulares sometidos a carga dinámica (extraída de la Tabla 6.3 del código AWS D1.1-2010)	70
Tabla 2.5: Selección del procedimiento (extraída de la Tabla 6.7 del código AWS D1.1– 2010)	71
Tabla 2.6: Selección de los ángulos de ensayo (extraída de la Tabla 6.7 del código AWS D1.1 – 2010)	72
Tabla 2.7: Criterio UT de aceptación –rechazo, para conexiones no tubulares, sometidos a cargas estáticas (extraída de la Tabla 6.2 del código AWS D1.1-2010).....	74
Tabla 2.8: Criterio UT de aceptación –rechazo, para conexiones no tubulares, sometidos a cargas dinámicas (extraída de la Tabla 6.3 del código AWS D1.1-2010)	75

INTRODUCCIÓN

Justificación:

El método de inspección por ultrasonido es una técnica de Ensayos No Destructivos (END), muy utilizada en el control de calidad en las diferentes ramas de la industria, tales como metalmecánica, aérea, naval, etc. Ha resultado muy útil para la detección y caracterización de defectos, medición de la degradación y corrosión de los metales, medición de espesores y propiedades elásticas, evaluación del desempeño de los materiales, todo ello sin necesidad de destruir la muestra o alterar la estructura de ingeniería, inclusive es aplicable a grandes espesores.

Objetivos del informe:

Dar a conocer la aplicación del ensayo de ultrasonido, con la técnica de pulso - eco, mediante el uso del equipo de ultrasonido USM Go, en la inspección de estructuras soldadas de acero.

CAPITULO I

FUNDAMENTO TEORICO

1.1 Antecedentes históricos:

Las primeras investigaciones que mencionan al ultrasonido como fenómeno natural datan del s. XVIII, de la mano del biólogo italiano, Lazzaro Spallanzani, que descubrió la presencia de dichas ondas tras analizar el sistema de guiado basado en ultrasonidos que utilizan los murciélagos para orientarse durante el vuelo. Spallanzani constató la existencia de las ondas ultrasónicas, tras observar la pérdida de la orientación de los murciélagos, cuando se les obstruía las orejas.

Durante el s. XIX, diversos científicos desarrollaron el fenómeno acústico. En 1819, Cagniard de la Tour inventó la sirena acústica, la cual permite medir el tono de un sonido por medio de una corriente de aire que acciona un disco con orificios emitiendo un sonido al girar, tanto más agudo, cuanto mayor sea su velocidad; una vez alcanzado el tono deseado, un mecanismo mide el número de vibraciones pudiéndose calcular la frecuencia del sonido emitido. En la primera mitad del siglo XIX, el físico y matemático austriaco, Christian Andreas Doppler observó ciertas propiedades de la luz en movimiento y descubrió un cambio de frecuencia de una onda debido al movimiento relativo entre la fuente, el emisor y el medio de propagación, propiedades que eran aplicables a las ondas ultrasónicas, que se conoció posteriormente como "Efecto Doppler". En 1883, el polímata inglés, Francis Galton, diseña el denominado "silbato de Galton", para la determinación de límites auditivos, que fue utilizado para controlar

perros con sonidos inaudibles por los seres humanos. En la segunda mitad del siglo XIX los hermanos Jacques y Pierre Curie descubrieron una propiedad común de ciertos cristales denominada "Efecto piezoeléctrico", el cual consiste en la aparición de cargas eléctricas en las caras de determinados cristales, cuando se les somete a tensiones mecánicas; publicaron sus primeras observaciones sobre el fenómeno piezoeléctrico en 1890, que sirvió como base para diversas aplicaciones de los ultrasonidos.

Durante el siglo XX se siguió desarrollando el uso de los ultrasonidos. En 1912, el hundimiento del fastuoso trasatlántico Titanic fue el hecho que impulsó el desarrollo de una de las grandes aplicaciones de los ultrasonidos en la marina: el SONAR (Sound Navigation and Ranging); que fue descubierto por el físico francés Paul Langevin y fue concebido para detectar la presencia de icebergs con ondas ultrasónicas; inicialmente no tenía mucho alcance pero supuso la base de la detección submarina. En 1917, Paul Langevin y Chilowski, produjeron el primer generador piezoeléctrico de ultrasonidos cuyo cristal funcionaba tanto como emisor y receptor, y al recibir vibraciones mecánicas, originaba cambios eléctricos; dicho dispositivo tuvo su aplicación en la medición de la profundidad del fondo marino, y más concretamente, en la detección de submarinos durante la I Guerra Mundial. En 1929, el científico ruso, Sergei Sokolov, desde el Instituto Electrotécnico de Leningrado, comenzó a utilizar los ultrasonidos en la detección de grietas en materiales sólidos; los experimentos iniciales se basaron en la medición de la pérdida de la intensidad de la energía acústica al viajar en un material; para tal procedimiento se requería del empleo de un emisor y un receptor de la onda ultrasónica. Posteriormente durante la segunda guerra mundial, los ingenieros alemanes y soviéticos se dedicaron a desarrollar equipos de inspección ultrasónica para aplicaciones militares; en ese entonces la técnica seguía empleando un emisor y un receptor en la realización de ensayos. En 1940, basándose en los estudios de Sokolov, el estadounidense Fred A. Firestone, desarrolló el reflectoscopio supersónico, que empleaba pulsos de ondas ultrasónicas para obtener reflexiones de pequeñas discontinuidades en sólidos; logró desarrollar el primer equipo que empleaba un mismo

transductor como emisor y receptor, basado su técnica de inspección en la propiedad característica del sonido de reelegarse al alcanzar una interfase acústica. Es así como nace la inspección de pulso - eco; esta nueva era permitió al ultrasonido competir en muchas ocasiones y superar las limitaciones técnicas de la radiografía, ya que se podían inspeccionar piezas de gran espesor o de configuraciones que solo permitían el acceso por un lado. El perfeccionamiento del instrumento de inspección por ultrasonido se debe principalmente a los investigadores alemanes Josef y Hebert Krautkramer, quienes desde 1948 se han dedicado a desarrollar y mejorar el equipo de inspección ultrasónica.

En los últimos años, el progreso en la instrumentación y la tecnología electrónica han hecho que la técnica ultrasónica se haya desarrollado, teniendo hoy en día gran aplicación en el control de calidad de materiales. Los equipos que empleamos actualmente permiten detectar discontinuidades superficiales, sub-superficiales e internas, dependiendo del tipo de transductor utilizado y de las frecuencias que se seleccionan, que generalmente están en el rango de 0.25 MHz a 25 MHz.

1.2 Principio físico de las ondas ultrasónicas

El sonido es la propagación de energía mecánica (Vibraciones) a través de sólidos, líquidos y gases. En el espectro acústico (Figura 1.1) se distinguen tres zonas, que son la infrasónica, la sónica y la ultrasónica.

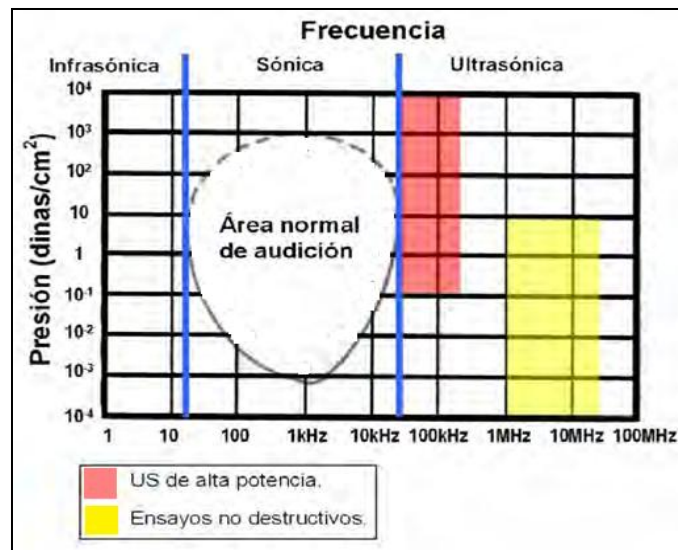


Figura 1.1: El espectro acústico.

La zona infrasónica se encuentra por debajo de los 16 Hz y no tiene aplicación en el control de materiales estructurales.

La zona sónica tiene un rango de frecuencias audibles para el ser humano, que se encuentra entre 16 Hz y 20 KHz.

La zona ultrasónica se encuentra por encima de los 20 KHz. Esta zona se divide a su vez en otras tres que son: entre 20 y 120 KHz, el cual es la zona de ultrasonido próximo, que manejan técnicas con elevados niveles de energía: sistemas de limpieza, agitación y cavitación; entre 0.25 y 25 MHz, el cuál es la zona que se utiliza para control de calidad

de materiales, aunque normalmente se utilizan frecuencias entre 1 y 5 MHz; y mayores de 100 MHz, el cual es la zona que se emplea para microscopía acústica.

Por lo tanto, con lo anterior podremos decir, que el ultrasonido son ondas sonoras con frecuencias mayores al rango audible, el cual se propaga a través de las partículas capaces de vibrar de los materiales. A frecuencias mayores a 100,000 ciclos/seg, y gracias a su energía, el sonido forma un haz similar a la luz, por lo que es utilizado para rastrear el volumen de materiales. Un haz ultrasónico cumple con algunas reglas físicas de óptica por lo que puede ser reflejado, refractado, difractado y absorbido.

Las vibraciones pasan a través de un material sólido como una sucesión de desplazamiento de partículas. La estructura de un material está constituida por muchas partículas pequeñas o grupos de átomos; estas partículas poseen posiciones normales o de reposo y pueden ser desplazados desde estas posiciones por alguna fuerza; cuando la fuerza es retirada, las partículas tienden a regresar a sus posiciones originales. La energía es transmitida a través de un material sólido mediante una serie de desplazamientos de pequeñas partículas dentro del material. La transmisión de las vibraciones ultrasónicas a través de un material está relacionada con las propiedades elásticas de este material. Si se golpea una superficie de un metal, este se deforma hacia adentro causando un desplazamiento; debido a que el material es elástico, la superficie tiende a regresar a su posición original (reposo). La superficie se moverá a su posición original y continuará moviéndose hasta alcanzar una distancia máxima en la dirección opuesta. Esta secuencia completa de movimientos es definida como un “ciclo”.

El sonido viaja en un metal de forma similar que en el aire. El sonido es una vibración y tiene rangos de frecuencias. Por principio las ondas ultrasónicas pueden propagarse a través de todo los medios donde existe materia, esto son, átomos o partículas capaces de vibrar, por lo cual se puede propagar a través de sólidos, líquidos y gases. Por el contrario no puede propagarse en el vacío por no existir materia que la sustente.

1.3 Parámetros de las ondas ultrasónicas

Como sabemos, la propagación del ultrasonido está caracterizada por vibraciones mecánicas periódicas, representadas por movimientos ondulatorios (ondas senoidales). Del movimiento ondulatorio debe mencionarse que cuenta con varias características, de las cuales se detalla las más importantes, como son: longitud de onda, amplitud y frecuencia.

La longitud de onda se puede definir como la distancia requerida para completar un ciclo o la distancia desde un punto dado en un ciclo al mismo punto en el siguiente ciclo, se denota con la letra griega “ λ ”. Se maneja en las unidades del sistema internacional (m, cm, mm) o del sistema inglés (pulg).

La amplitud es el máximo cambio producido en la presión de la onda, es decir la distancia máxima que alcanza la partícula vibratoria, desde su posición inicial de reposo (altura de la curva senoidal). La amplitud se relaciona con la intensidad; de este modo si aumentamos la intensidad de una onda determinada, aumentaremos su amplitud. Durante la transmisión de las ondas, por efecto de su interacción con el medio, disminuye la intensidad de la onda en función de la distancia recorrida y como consecuencia se produce una disminución de su amplitud.

La Frecuencia se define como el número total de ciclos completos que pasan por un punto por unidad de tiempo, normalmente un segundo; se denota por la letra “f”. En ultrasonido se maneja en unidades de Hertz (Hz), el cual tienen la siguiente equivalencia: 1 Hertz = 1Hz = 1Ciclo/Segundo. Debido a las frecuencias tan elevadas que se usan en la inspección por ultrasonido, se recurre al uso de los siguientes múltiplos: 1000 ciclos/seg = 1KHz y 1000000 ciclos/seg = 1MHz.

1.4 Tipos de ondas ultrasónicas

Como se ha mencionado, la energía ultrasónica se propaga en un material por medio de vibraciones de sus partículas. La dirección en la que vibran las partículas con respecto a la dirección en la que se propaga la onda ultrasónica hace posible la existencia de varios tipos de ondas: ondas longitudinales o de compresión, ondas de corte o transversales, ondas superficiales o de Rayleigh y ondas lamb. Este informe, se basa en el estudio de las ondas longitudinales y transversales, los cuales se detallan a continuación.

Las ondas longitudinales o de compresión se caracterizan principalmente, en que provoca que las partículas vibren en la dirección paralela con respecto a la dirección de propagación de la onda ultrasónica, también son llamadas ondas de compresión. En la Figura 1.2 se ha esquematizado la propagación del ultrasonido mediante ondas longitudinales, se observa que si la onda ultrasónica incide normalmente a la superficie, la propagación de la misma, dentro del material provocará la oscilación de las partículas alrededor de su posición de equilibrio, pero en la misma dirección de propagación. En un instante dado podríamos imaginar que la posición de las partículas en el material sería la que se indica en la parte inferior de la Figura 1.2, en la cual se observa zonas en que las partículas que se han alejado entre si y zonas que se han acercado. La distancia entre dos puntos medios de las zonas consecutivas de igual concentración de partículas corresponde a la longitud de onda del haz ultrasónico. Las ondas longitudinales es el único modo de onda que puede propagarse a través de sólidos, líquidos y gases. Cuando se utiliza este modo de vibración en la inspección por ultrasonido se identifica comúnmente con el término de “Haz recto”.

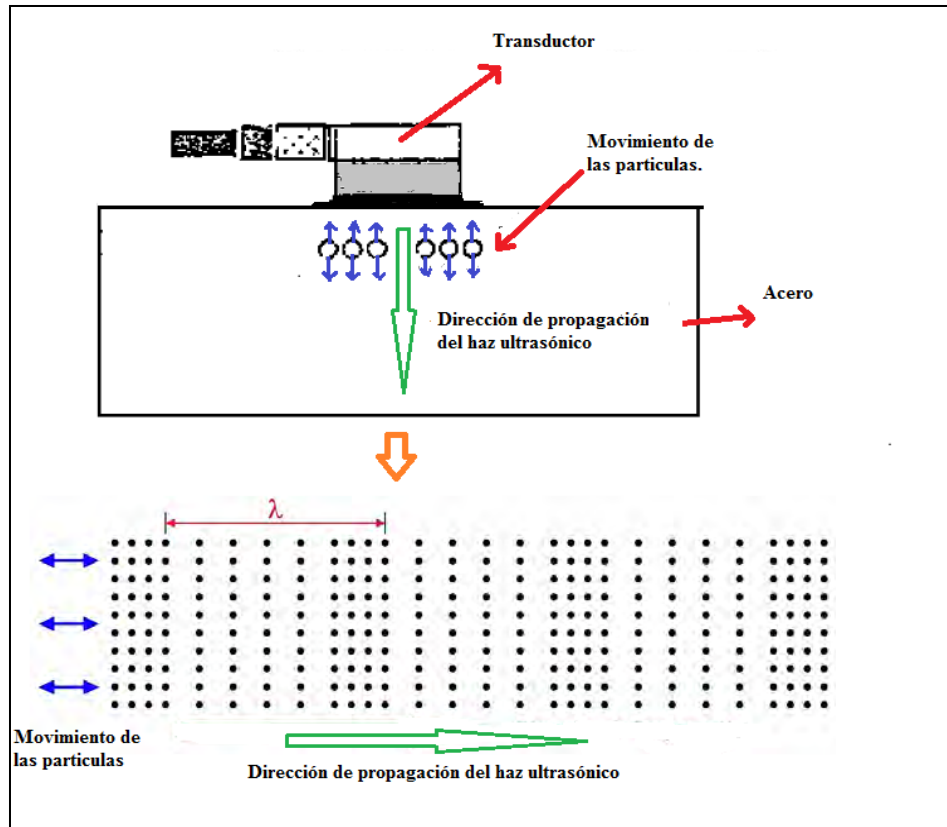


Figura 1.2: Las ondas longitudinales.

Las ondas de corte o transversales están caracterizadas en que las partículas vibran en dirección perpendicular con respecto a la propagación de la onda ultrasónica. Esta forma de onda se propaga solamente a través de sólidos. Su velocidad es aproximadamente la mitad de la velocidad de las ondas longitudinales. Las ondas de corte son introducidas en la pieza utilizando un transductor de haz angular en el método por contacto. El transductor de haz angular consiste de un elemento transductor montado sobre una zapata de plástico, de tal manera que la onda ultrasónica se introduzca en el material de prueba con un ángulo diferente a 90° , con respecto a la superficie del material sujeto a inspección. En la Figura 1.3 se ha esquematizado la propagación de las ondas transversales. En este caso se ve que las partículas se alejan y se acercan a su posición de

equilibrio en dirección normal a la propagación de la onda manteniendo constante sus distancias relativas. Se identifican comúnmente con el término de “Haz angular”.

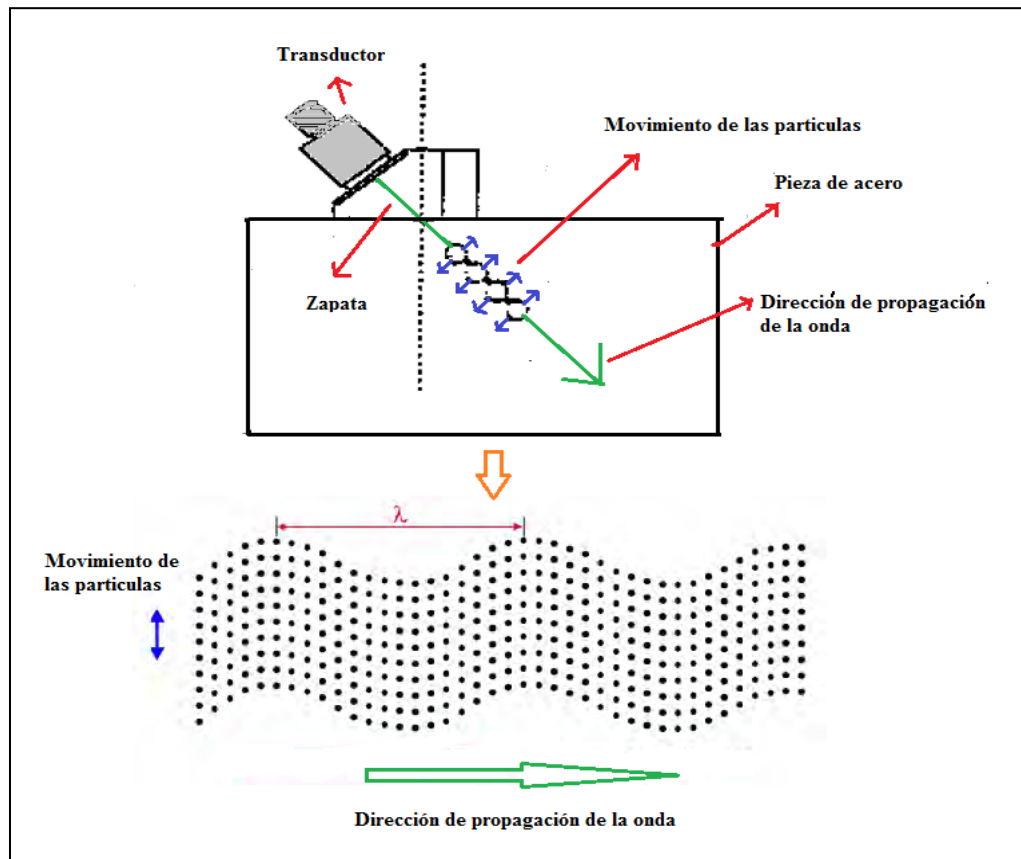


Figura 1.3: Las ondas transversales.

1.5 Características de propagación de las ondas ultrasónicas.

En la técnica de inspección por ultrasonido se debe considerar el siguiente principio: la propagación de un haz ultrasónico es influenciada por las propiedades acústicas del medio en el cual se propaga.

La presión acústica, en un medio, cuando hay una gran densidad de partículas, la presión es mayor de la normal, sin embargo, cuando hay menor densidad de partículas, la presión es menor. Si se colocase un medidor de presiones microscópica en el campo creado por la onda se obtendrán presiones altas y bajas de forma alterna, siguiendo una secuencia periódica. Esa presión alterna periódica, debida a la onda acústica es la que se llama presión acústica (P). Para las ondas longitudinales se define como la fuerza por unidad de superficie normal al frente de onda y, para las transversales se define como la fuerza por unidad de superficie paralela al frente de onda.

La intensidad acústica se define como la cantidad de energía que pasa por unidad de área y por unidad de tiempo. La intensidad disminuye con la distancia.

La velocidad acústica corresponde a la velocidad de propagación del sonido en un material, es decir, la distancia recorrida por las ondas en el material por unidad de tiempo. Es característica y constante para cada medio y está relacionada con la frecuencia y la longitud de onda.

$$c = \lambda f \quad (1.1)$$

Donde: c = velocidad acústica (Pulg/seg o mm/seg). ; λ =longitud de onda (pulg o mm).
y f = Frecuencia (ciclos/seg).

Como vimos anteriormente, dependiendo de la forma en que se propagan las ondas, se tiene la velocidad acústica longitudinal y transversal.

La velocidad acústica longitudinal (C_L) y transversal (C_T) se definen mediante las expresiones (1.2) y (1.3) respectivamente, donde E es el módulo de elasticidad que se mide en N/m^2 , μ es el coeficiente de Poisson que es adimensional, y ρ , la densidad del material que se mide en kg/m^3 .

$$C_L = \sqrt{\left(\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}\right) \left(\frac{E}{\rho}\right)} \quad (1.2)$$

$$C_T = \sqrt{\left(\frac{1}{(1+\mu)}\right) \left(\frac{E}{2\rho}\right)} \quad (1.3)$$

Estas dos velocidades están relacionadas entre sí como puede observarse en (1.4)

$$C_L = C_T \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{(1-2\mu)}} \quad (1.4)$$

A continuación se muestra la Tabla 1.1, en donde se dan los valores de las velocidades longitudinales y transversales para diferentes materiales.

Tabla 1.1: Velocidad longitudinal y transversal.

Material	Densidad (g/cm ³)	C _L (Km/Seg)	C _T (Km/Seg)
Aluminio	2.7	6.32	3.13
Plomo	11.4	2.16	0.7
Acero	7.7	5.92	3.23
Hierro fundido	7.2	3.52 a 5.6	2.2 a 3.22
Cobre	8.9	4.7	2.26

La velocidad instantánea de vibración es la velocidad propia de la partícula en su movimiento oscilatorio. Su valor máximo se denota con V.

La impedancia acústica es definida como el producto de la velocidad de propagación, por la densidad específica del mismo, se simboliza por la letra “Z”. También puede ser definida como la resistencia que ponen los materiales a la propagación del sonido .La energía transmitida o reflejada depende exclusivamente de la impedancia acústica de los medios en cuestión.

$$Z = \frac{P}{v} = \rho c \quad (1.5)$$

Donde: Z = Impedancia acústica del material; ρ = Densidad del material y c = Velocidad de propagación del sonido.

Ejemplo: Si la velocidad de propagación en el acero es de 5900 m/s y la densidad específica del material es 7.7 gr/cm^3 determine la impedancia acústica para el acero.

Solución:

De la ecuación (1.5): $Z = \rho c$

$$\rho = 7.7 \text{ g/cm}^3 = 7700 \text{ Kg/m}^3$$

$$Z = (7700 \text{ Kg/m}^3) \times (5900 \text{ m/seg})$$

$$Z = 45 \times 10^6 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{seg}$$

1.6 Efectos de la interfase acústica

Todos los materiales poseen una superficie límite o contorno en la cual la propagación ultrasónica se altera. Cuando el material está rodeado de un espacio vacío, no existe transmisión de ondas ultrasónicas, porque necesitan la presencia de un medio material. En este caso, la onda, al llegar al borde, regresa de una manera u otra. Si la superficie límite es lisa se produce reflexión y, si es rugosa, se produce dispersión. En esta última situación, las irregularidades de la superficie se deben medir en términos de la longitud de onda del haz incidente.

Si otro material se adhiere a la superficie límite de otro, se produce transmisión y la onda que viaja por el primer medio se propaga por el segundo medio. El límite entre medios se denomina interfase. Este es el caso que se va a estudiar a continuación considerando incidencia normal y angular.

La Incidencia normal de una onda ultrasónica sucede cuando la onda incide perpendicularmente sobre una superficie plana y lisa, que forma interfase entre dos medios de diferentes propiedades elásticas, una parte de la energía acústica incidente se refleja y retorna en la misma dirección del incidente y otra parte se transmite al segundo medio, siguiendo idéntica dirección y sentido como puede observarse en la Figura 1.4.

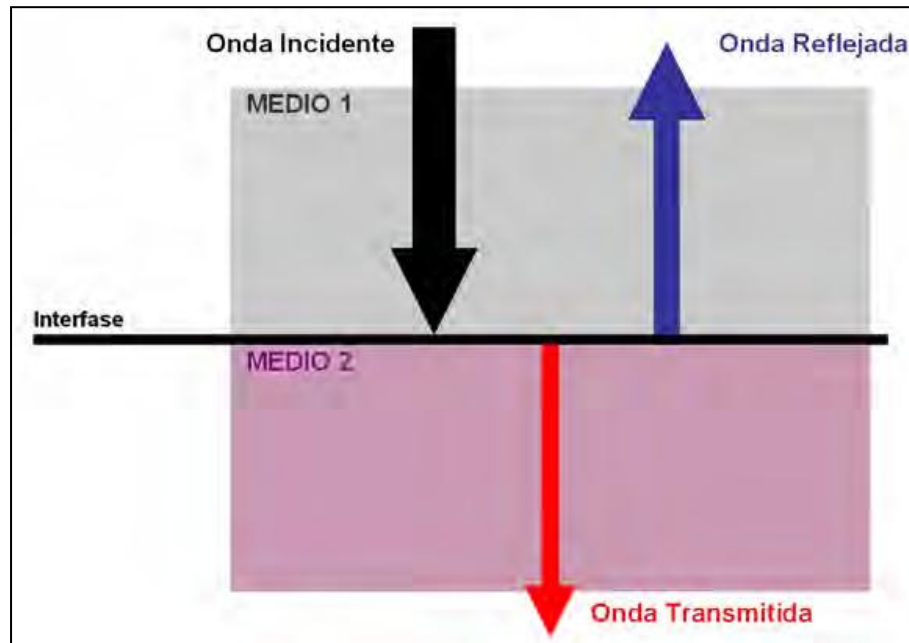


Figura 1.4: Incidencia normal.

Si se realiza un balance energético en la interfase, se verifica que la energía incidente es igual a la suma de las energías transmitida y reflejada y se cumple independientemente del lado por el que incide la onda ultrasónica. Se expresa este balance de energía expresada en intensidad en (1.6)

$$I_i = I_r + I_t \quad (1.6)$$

La porción de energía que se refleja y que se transmite depende de la impedancia acústica de los medios y se cuantifica con los factores de transmisión (T) y de reflexión (R), que se calculan siguiendo la teoría de la propagación de las ondas acústicas, donde Z_1 y Z_2 son las impedancias acústicas de los medios 1 y 2 respectivamente. Estos coeficientes son adimensionales y expresan respectivamente, la relación de la intensidad reflejada y transmitida con respecto a la intensidad incidente.

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2} \quad (1.7)$$

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (1.8)$$

Teniendo en cuenta las expresiones (1.6), (1.7) y (1.8), se obtiene:

$$T + R = 1 \quad (1.9)$$

Puesto que la amplitud del eco que aparece indicado en un equipo de ultrasonido es proporcional al valor de la presión acústica, entonces considerando la presión acústica se obtiene que la presión reflejada es de la misma amplitud que la incidente e independiente de la secuencia de los materiales. Sin embargo, la presión transmitida depende de la secuencia de los materiales y es de diferente amplitud que la incidente. En este caso el balance de presiones en la interface se muestra en (1.10).

$$P_t = P_i + P_r \quad (1.10)$$

Los coeficientes de transmisión y de reflexión para este caso se muestran en las expresiones (1.11) y (1.12).

$$T' = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2 Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \quad (1.11)$$

$$R' = \frac{P_r}{P_i} = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_1 + Z_2)} \quad (1.12)$$

Combinando las expresiones (1.10), (1.11) y (1.12), se obtiene:

$$1 + R' = T' \quad (1.13)$$

Si la impedancia acústica de los medios son iguales, ósea $Z_1 = Z_2$, entonces no habrá reflexión ($R'=0$), el sonido pasa a través de la interfase sin alterarse ($T'=1$)

Ejemplo: Considere dos medios diferentes tales como el agua y el acero. Calcule para el caso de ondas longitudinales, los factores de transmisión y de reflexión sónica.

Solución:

$$Z (\text{acero}) = 45 \times 10^6 \text{ Kg/m}^2\cdot\text{seg} \text{ (medio 1)}$$

$$Z (\text{agua}) = 1.5 \times 10^6 \text{ Kg/m}^2\cdot\text{seg} \text{ (medio 2)}$$

Caso(a): Sea $Z_1 = Z (\text{acero})$ y $Z_2 = Z (\text{agua})$

Reemplazando valores en (1.11) se obtiene:

$$T' = 0.065 \text{ o } 6.5\% \text{ (Factor de Transmisión)}$$

$$\text{Como } R'+1=T' \quad R' = -93.5\% \text{ (Factor de Reflexión)}$$

Caso (b): Si $Z_1 = Z (\text{agua})$ y $Z_2 = Z (\text{acero})$

$$T' = 1.937 \text{ o } 193.7\% \text{ (Factor de Transmisión)}$$

$$R' = 93.7\% \text{ (Factor de Reflexión)}$$

De lo anterior se deduce que si $Z_2 > Z_1$, entonces R' será positivo, lo que indica que la onda incidente y reflejada estarán en la misma fase, y en caso contrario $Z_2 < Z_1$, entonces $R' < 0$, lo que indica una inversión de fase de la onda reflejada con relación a la incidente. Además la amplitud acústica reflejada será de la misma amplitud, cualquiera

sea el lado de la superficie límite sobre el cual incide la onda, es decir, es independiente de la secuencia de ambos materiales.

En cambio la presión acústica transmitida, si bien está en fase con la onda incidente, no será independiente de la secuencia de los dos materiales, de manera que si $Z_2 > Z_1$, entonces, $T' > 1$, lo que indica que su amplitud será mayor que la de la onda incidente y en caso contrario, si $Z_2 < Z_1$, entonces, $T' < 1$, y por lo tanto la amplitud será menor que la de la onda incidente. Ver Figura 1.5:

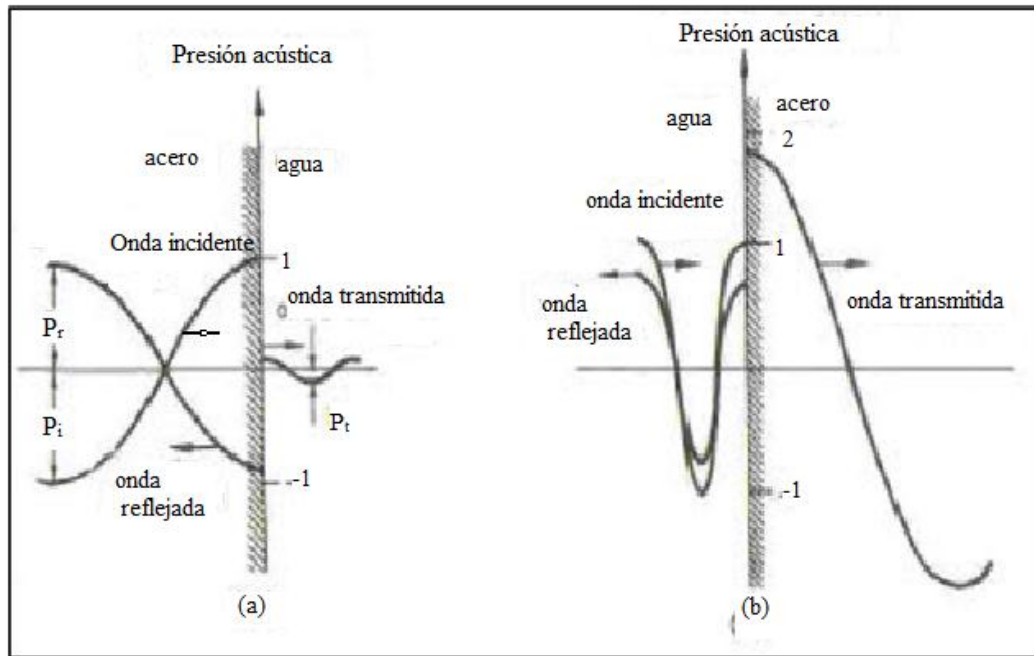


Figura 1.5: Valores de la presión acústica, en el caso de reflexión, en una superficie límite, acero – agua.

El conocimiento de los factores de transmisión y reflexión es importante, pues justifica el uso de líquidos acoplantes como contacto entre el transductor y el material examinado. Así mismo define la posibilidad de aplicación del examen ultrasónico en cierto tipo de uniones soldadas. En los cálculos de transmisión, no se ha considerado la

pérdida de energía debido al mal acoplamiento entre el transductor y la pieza, así como las irregularidades superficiales responsables por la aparición de múltiples reflexiones.

La Incidencia angular de una onda ultrasónica se da cuando la onda incide con un determinado ángulo con respecto a la normal en una superficie que limita dos medios, parte del haz se refleja y parte se transmite al segundo medio, produciéndose un fenómeno de refracción, que consiste en que el haz transmitido experimenta un cambio en la dirección de propagación con respecto a la dirección de incidencia, al igual que ocurre en óptica.

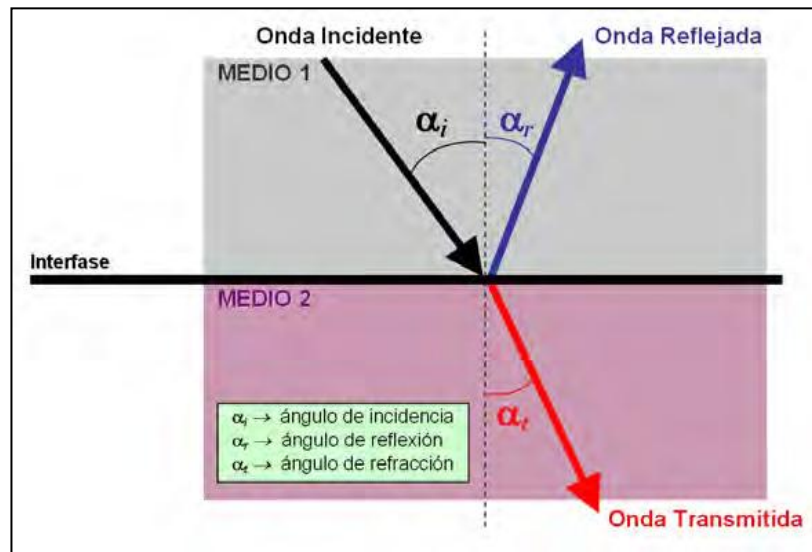


Figura 1.6: Incidencia angular.

En la Figura 1.6 vemos el fenómeno explicado anteriormente con las ondas incidente, reflejada y refractada. Teniendo en cuenta la velocidad de propagación del sonido en los medios 1 (C_1) y 2 (C_2) podemos relacionar los ángulos de incidencia (α_i), reflexión (α_r) y refracción (α_t), en función de las velocidades, mediante la Ley de Snell:

$$\frac{\text{sen } \alpha_i}{C_1} = \frac{\text{sen } \alpha_r}{C_1} = \frac{\text{sen } \alpha_t}{C_2} \quad (1.14)$$

De la ecuación (1.14) se deduce que el ángulo de incidencia (α_i) es igual al ángulo de reflexión (α_r).

Los fenómenos de reflexión y refracción que sufre una onda sonora al incidir oblicuamente sobre una superficie que separa dos medios, son los mismos que ocurren en óptica; pero con la onda sonora ocurre además un fenómeno denominado, conversión de modos, que consiste en que un tipo de onda puede convertirse en otra, es decir, una onda longitudinal en transversal y viceversa.

La conversión de modos se produce porque la presión acústica de la onda longitudinal incidente, al incidir oblicuamente en la superficie límite, puede descomponerse en dos componentes, una que actúa a lo largo de la superficie límite, y otra que actúa perpendicularmente a ella. Por tanto, en el punto de incidencia, la superficie límite está sometida a esfuerzos de compresión y cizalladura, produciéndose, por tanto, la reflexión y refracción de ondas de compresión y ondas de cizalladura.

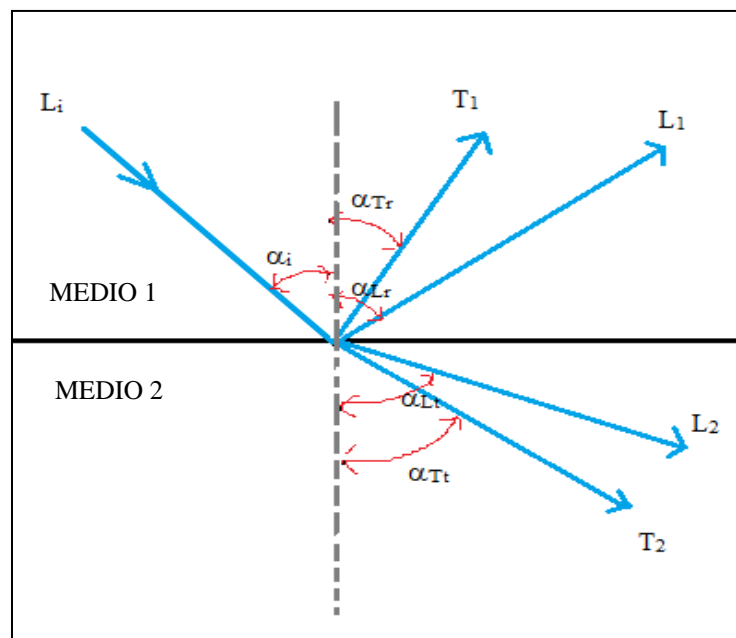


Figura 1.7: Conversión de modos.

La onda longitudinal incidente (L_i), como se muestra en la Figura 1.7 se dirige oblicuamente a la superficie límite de separación de los medios 1 y 2, donde se refleja y se refracta, dando lugar a las siguientes ondas: T_1 y T_2 (ondas transversales reflejada y refractada respectivamente), y L_1 y L_2 (ondas longitudinales reflejada y refractada respectivamente).

Aplicando la ley de Snell relacionamos la velocidad de propagación C_1 y C_2 , en los medios 1 y 2, con los senos de los ángulos longitudinal incidente (α_{Li}); transversal reflejado (α_{Tr}), longitudinal reflejado (α_{Lr}); longitudinal refractado (α_{Lt}) y transversal refractado (α_{Tt}), de la siguiente forma:

$$\frac{\text{sen } \alpha_{Li}}{C_1} = \frac{\text{sen } \alpha_{Lr}}{C_1} = \frac{\text{sen } \alpha_{Tr}}{C_1} = \frac{\text{sen } \alpha_{Lt}}{C_2} = \frac{\text{sen } \alpha_{Tt}}{C_2} \quad (1.15)$$

De estas igualdades deducimos directamente dos conclusiones:

1. En el ensayo de materiales, lo normal es que $C_2 > C_1$, por lo tanto la onda longitudinal refractada se separa de la normal, lo que hace que siempre el ángulo de refracción sea mayor que el de incidencia.
2. Al ser casi el doble la velocidad de la onda longitudinal, en un mismo medio, que la velocidad de la onda transversal; hace que el ángulo de las ondas longitudinal reflejada y longitudinal refractada, sea mayor que los ángulos de la transversal reflejada y refractada.

Debido a la construcción de los transductores angulares utilizados en las aplicaciones prácticas de ensayos de materiales por ultrasonidos, el medio 1 es plexiglás, y el 2 es acero. Sabemos que: la velocidad de la onda longitudinal en plexiglás es 2730 m/s; la

velocidad de la onda longitudinal en acero es 5900 m/s; y la velocidad de la onda transversal en acero es 3230 m/s. Aplicando la ley de Snell (1.14) tendremos:

$$\frac{\text{sen } \alpha_{Li}}{2730} = \frac{\text{sen } \alpha_{Lt}}{5900} = \frac{\text{sen } \alpha_{Tt}}{3230} \quad (1.16)$$

En el ensayo de materiales, y sobre todo en el ensayo de soldaduras, nos interesa que dentro del medio 2, sólo haya una onda transversal refractada, lo cual se consigue variando el ángulo de incidencia, con lo que la onda longitudinal se refracta en la superficie límite ($\alpha_{Lt} = 90^\circ$). Si en la igualdad hacemos el ángulo $\alpha_{Lt} = 90^\circ$ y despejamos, vemos que el ángulo de la onda incidente (α_{Li}), es de 27.6° , y en el acero sólo queda la onda transversal refractada (α_{Tt}), con un ángulo de 33° . Si seguimos aumentando el ángulo de incidencia, hasta que el ángulo de la onda refractada transversal (α_{Tt}) sea igual a 90° , aplicando la ley de Snell obtenemos que $\alpha_{Li} = 57.8^\circ$. El ángulo de 27.6° se conoce como primer ángulo crítico, y al ángulo de 57.8° se conoce como segundo ángulo crítico. A un ángulo de incidencia mayor al segundo ángulo crítico, en la pieza de prueba ya no se generaran ondas transversales. Si se emplea un ángulo de incidencia ligeramente mayor al segundo ángulo crítico (5° a 10°), se generaran ondas superficiales.

1.7 Mecanismos de Atenuación

Cuando se tiene un medio ideal, la atenuación de la presión acústica depende únicamente de la divergencia de la onda. Cuando se tiene un material sólido, se produce una atenuación mayor o menor debido a dos razones: la dispersión y la absorción. Estos fenómenos constituyen la atenuación.

La dispersión es causada principalmente por la no homogeneidad de los materiales, ya que poseen pequeñas heterogeneidades, superficies límite o entre caras, que hacen que varíe la densidad del medio y la velocidad de propagación de la onda y, en consecuencia, se producen cambios en la impedancia acústica del material. Estas heterogeneidades actúan como focos dispersores de las ondas y aparecen debido a diversos motivos como son: la presencia de inclusiones, que son impurezas que aparecen en el material, en los aceros, las inclusiones, suelen estar formadas por partículas no metálicas e insolubles que quedan retenidas en el material durante la fundición; pueden aparecer heterogeneidades propias del material, naturales o intencionadas como es el caso de las porosidades de los materiales sinterizados o precipitados de distinta naturaleza como es el grafito en las fundiciones grises; puede deberse a fases de diferente composición en la estructura cristalina de los metales (acero, latón). En cristales cuya estructura está constituida por una única fase puede ocurrir que los granos estén orientados al azar o que posean propiedades anisotrópicas, lo que constituye una heterogeneidad para la onda ultrasónica. Con un tamaño de obstáculo del mismo orden que la longitud de onda del material, se producen fenómenos de dispersión según consideraciones de tipo geométrico - óptico. Cuando las ondas llegan al borde del obstáculo, parte de la onda se refleja y otra parte se transmite y este hecho se repite cada vez que la onda se encuentre con el borde de una heterogeneidad. De forma que la onda original se divide constante y continuamente en ondas parciales. Cuando el tamaño del obstáculo es menor que la longitud de onda del material no se interfiere la onda, propagándose como si la heterogeneidad no estuviese presente.

Los fenómenos de dispersión se han de tener muy en cuenta, porque además de producir una disminución de la amplitud del eco de fondo y la del eco del obstáculo, produce ecos parásitos de diferente recorrido (ruido de la señal), que pueden enmascarar ecos importantes.

La absorción se produce por la conversión de energía mecánica en calor y se debe a que disminuye la energía acústica por pérdidas de fricción. La propagación de la onda en el material, produce la vibración de las partículas, estas excitan a las siguientes y así sucesivamente; esta transmisión de las oscilaciones en el material produce el aumento de temperatura que atenúa la señal ultrasónica haciendo que disminuya su amplitud.

El coeficiente de atenuación acústica representa la cantidad de atenuación sónica por unidad de longitud de recorrido del sonido para cada material. También es función de la frecuencia y del tipo de onda. La atenuación crece con la frecuencia de la onda con lo que, para neutralizar dicho efecto, se pueden emplear frecuencias más bajas o incrementar la amplificación de la señal.

Además de los fenómenos de dispersión y absorción, existen otras causas que producen pérdidas de energía en la onda ultrasónica, como son pérdidas energéticas en el medio acoplante, cuando se utiliza la técnica de contacto; la dispersión debida a la rugosidad superficial del material y pérdidas por divergencia del haz. Todos estos factores producen la atenuación de la onda.

1.8 Principios del ensayo de ultrasonido

La técnica ultrasónica se basa en la capacidad que tienen los sólidos de conducir las ondas acústicas. Teniendo en cuenta esta propiedad, las ondas ultrasónicas se reflejan tanto en las superficies de separación entre medios como en discontinuidades internas del material, hecho que se utiliza para diagnosticar la presencia de heterogeneidades en los sólidos inspeccionados. La inspección ultrasónica para la detección de dichas heterogeneidades, no es posible sin el uso de los transductores, que son unos dispositivos que convierten energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Su modo de funcionamiento, se fundamenta en la excitación del oscilador mediante una corta descarga eléctrica que transmite un pulso ultrasónico. Cuando dicho elemento recibe una señal ultrasónica, genera una señal eléctrica lo cual produce su oscilación.

1.8.1 Modo de generación de ondas ultrasónicas

Hasta ahora hemos descrito someramente la forma de propagación de las ondas a presión, sin ocuparnos de su generación. Vamos a ocuparnos ahora de este último concepto. Para la generación de ondas a presión se utilizan diferentes medios, el más corriente es el altavoz y para recibir esta onda se puede utilizar un micrófono. Sin embargo para nuestro cometido, necesitamos de un elemento que nos sirva al mismo tiempo de generador y receptor. Este elemento que cumple las dos condiciones, bien puede ser un material piezoeléctrico, que tiene la propiedad de deformarse al recibir una presión mecánica externa, produciendo un voltaje eléctrico en sus caras, y a la inversa, al aplica un potencial eléctrico a sus caras, este material cambia de tamaño, produciendo una onda de presión. El material más comúnmente usado es el cuarzo. El accesorio adaptado a la inspección, es conocido como transductor, palpador, unidad de rastreo, cristal o sonda, pero en este informe se llama, transductor. El diseño y construcción de un transductor ultrasónico, depende de ciertos factores y variables involucradas como

son: el material del elemento activo (piezoeléctrico), el espesor del elemento activo, la placa frontal, la forma del transductor, y el grado de amortiguación.

Existen 4 tipos básicos de transductores ultrasónicos: haz recto de contacto, haz angular de contacto, doble cristal de contacto, y de inmersión. En este informe, se considera a los transductores de haz recto y haz angular. Un transductor está constituido por diferentes elementos, el ensamble típico de un transductor (Haz recto de contacto), se muestra en la Figura 1.8.

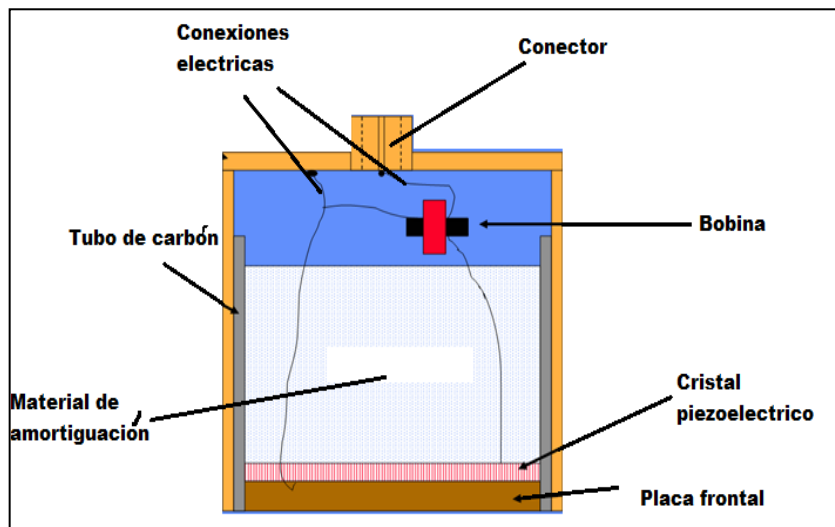


Figura 1.8: Partes de un transductor.

El elemento activo es el elemento principal en un transductor ultrasónico. En un transductor con frecuencia de hasta 100 KHz, el elemento activo consiste de un elemento magnetoestrictivo, por otro lado, para la inspección ultrasónica realizada con frecuencias arriba de los 100 KHz, son utilizados elementos piezoeléctricos.

El efecto piezoeléctrico es una propiedad inherente de ciertos cristales por la cual presentan una carga eléctrica superficial, cuando se les somete a una fuerza de tracción o de compresión. Dicha carga cambia su polaridad al invertirse la dirección de la fuerza.

Debido al fenómeno, cuando se le aplica un campo eléctrico a un material piezoeléctrico se reordenan sus moléculas produciendo una deformidad mecánica. Como el fenómeno es reversible, cuando se le somete a una corriente alterna, se produce una vibración que se transmite a otros medios. Por tanto pueden generarse vibraciones mecánicas tras aplicarse un campo eléctrico. Los materiales piezoeléctricos, con las mejores características para transductores ultrasónicos son: cuarzo (Cristal piezoeléctrico natural); sulfato de litio; cerámicas polarizadas (titanato de bario, metaniobato de plomo).

Tabla 1.2: Materiales piezoeléctricos y sus propiedades.

Material	Densidad (Kg/m ³)	Velocidad acústica (cm/seg)	Impedancia acústica (Kg/seg.cm ²)
Cuarzo	2650	57.60	152.64
Sulfato de litio	2060	47.20	97.23
Titanato de Bario	5070	44.00	223.08
Metaniobato de plomo	5800	28.00	162.40

El material de amortiguación o de respaldo, que soporta al elemento activo tiene una gran influencia sobre el funcionamiento del transductor ultrasónico. Las variaciones en la construcción o en el material de amortiguación pueden hacer un transductor ideal para una aplicación y muy malo para otra. El material de respaldo, tiene dos funciones: debe amortiguar las oscilaciones de inercia del elemento activo, al realizar esta función controla al ancho de banda del transductor; y debe de absorber las vibraciones hacia el interior del transductor para que no interaccione con la carcasa. El material de respaldo es fabricado de fibras plásticas o polvo de metal (Por ejemplo tungsteno), combinados con varios materiales plásticos.

La placa frontal tiene como funciones principales el de proteger al elemento activo de las condiciones presentes durante la inspección, y en algunos casos actuar como un lente. El transductor de contacto, debe ser de un material durable y resistente a la corrosión.

1.8.2 Clasificación de los transductores

Los transductores de haz recto de contacto, contiene un solo elemento activo que genera ondas longitudinales. Es el transductor frecuentemente utilizado por considerarse el más versátil en la detección de fallas. Debido a que es utilizado en contacto directo con la pieza, su superficie de contacto en general, es altamente resistente al desgaste. Los transductores de haz recto, tienen diversas aplicaciones como son: detección de fallas con haz recto; medición de espesores; detección y dimensionamiento de laminaciones; inspección de placas, billets, forjas, fundiciones, extrusiones y una variedad de otros materiales metálicos y componentes no metálicos. La Figura 1.9, ilustra ejemplos de los transductores de haz recto.



Figura 1.9: Transductores de haz recto.

Los transductores de haz angular, utilizan los principios de refracción y conversión de modo, para producir ondas transversales refractadas en la pieza inspeccionada. Utilizan una zapata normalmente fabricada de una resina (plexiglás, perspex, lucita, etc.), para que el ultrasonido viaje en forma indicada, con lo que al ser reflejado en la superficie posterior, mejora la habilidad de detección de discontinuidades con una orientación que no es paralela a la superficie de entrada. Este transductor, tiene ciertas aplicaciones como son: inspección de uniones soldadas; detección y dimensionamiento de grietas; inspección de sistema de tubería, tubos, forjas, fundiciones, y componentes estructurales. La Figura 1.10, ilustra ejemplos de los transductores de haz angular.

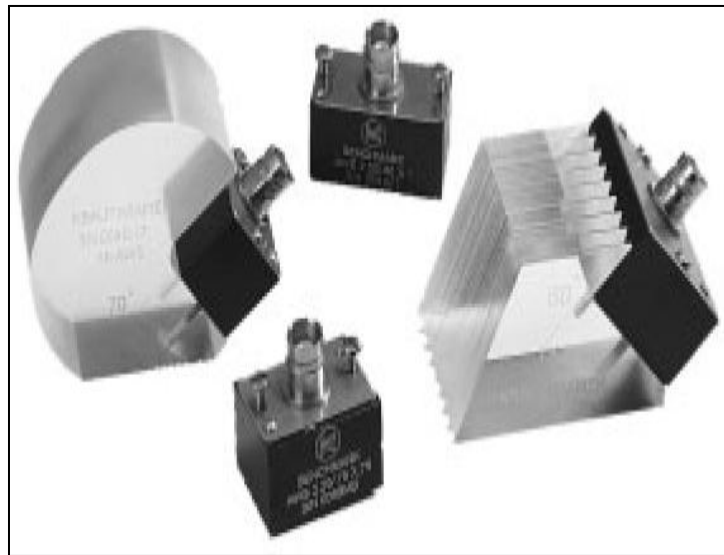


Figura 1.10: Transductores de haz angular.

1.8.3 Características de los transductores

En el diseño de los transductores deben ser contempladas dos características básicas: resolución y sensibilidad.

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

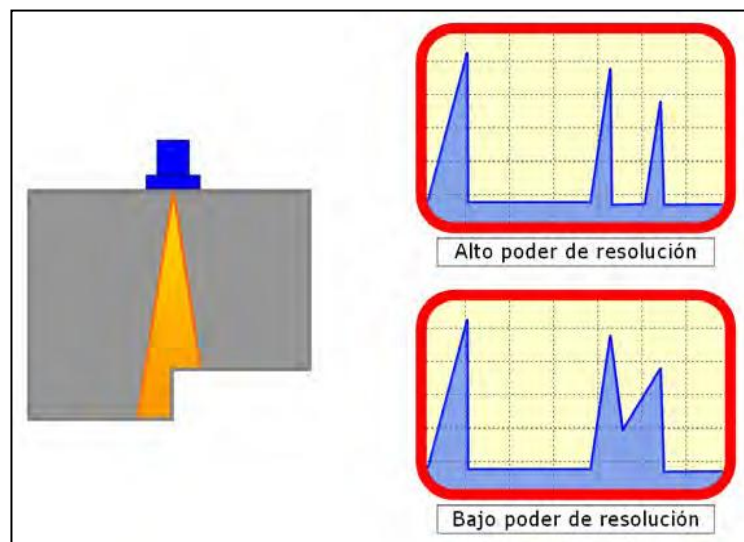


Figura 1.11: Poder de resolución de un transductor.

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

Estas dos características están referidas directamente a otros dos parámetros que son: factor de calidad y ancho de banda. Estos parámetros están relacionados de la siguiente manera:

$$Q = \frac{f_c}{f_2 - f_1} \quad (1.17)$$

Donde:

Q = Factor de calidad del elemento.

f_c = frecuencia central del transductor.

f_1 = frecuencia por debajo de f_c , para la cual la amplitud cae un 70%, con respecto al valor de amplitud a frecuencia f_c .

f_2 = frecuencia por encima de f_c en la cual la amplitud cae un 70%, con respecto al valor de amplitud a frecuencia f_c .

$f_2 - f_1$ = ancho de banda del transductor.

Para los transductores que se utilizan para ensayos no destructivos con ultrasonidos, el rango de valores de Q varía de 1 a 10.

Si el elemento activo del transductor, se encuentra fuertemente amortiguado, entonces se dice que es un transductor de banda ancha. Si el elemento activo del transductor, se encuentra ligeramente amortiguado, entonces se dice que es un transductor de banda angosta.

1.8.4 Selección de los transductores

Una primera elección, se realiza, a la hora de hacer distinción entre transductores para detectar reflectores, y transductores que determinen con precisión la profundidad y tamaño de este posible defecto.

La detección de reflectores, los cuales pueden ocupar diferentes posiciones y tener varias formas, requiere que el haz sonoro del transductor cubra la máxima superficie de la pieza examinada, por lo que son aconsejables transductores de relativamente baja frecuencia, que poseen una divergencia angular bastante grande. Estos transductores por el contrario, nos proporcionan una baja sensibilidad, por lo cual los reflectores que se encontraran, tendrán un tamaño relativamente grande. Si elegimos un haz sonoro estrecho con alta intensidad, podremos detectar reflectores muy pequeños en la pieza, por lo que se corre el riesgo de saltar algún defecto en la pieza.

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

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

Para el examen de materiales, cuya estructura metalográfica sea calificada como de grano fino, se ha encontrado que las frecuencias de ensayo más apropiadas son las comprendidas entre 2 y 5 MHz, teniendo una aceptable sensibilidad, junto con un poder resolutivo a grandes distancias. Para el acero, las longitudes de onda van de 1 a 3 mm,

por lo que en condiciones favorables, se podría detectar discontinuidades de 0.9 mm y mayores, tamaños que generalmente empiezan a ser tratados como defectos.

En materiales con estructuras de grano grueso, conviene utilizar frecuencias bajas del orden de 0.5 a 2 MHz, pudiéndose evaluar incluso materiales con un coeficiente de atenuación alto, tal y como pueden ser fundiciones, plásticos, etc.

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

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

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

El poder de resolución y la sensibilidad, dependen en gran medida de la frecuencia utilizada (a mayor frecuencia, mayor poder de resolución), pero también hay que tener en cuenta el tipo de cristal que se emplea. Generalmente, se pueden utilizar los transductores de titanato de bario, que junto con un buen poder resolutivo, poseen una sensibilidad muy aceptable. Si se desea una gran sensibilidad, se pueden utilizar transductores con cristales especiales, que pueden ser de sulfato de litio o metabionato de plomo.

En situaciones prácticas, la menor discontinuidad que puede encontrarse con ultrasonido es de alrededor de $1/2 \lambda$ (longitud de onda). Para detectar defectos pequeños, se necesitan transductores que produzcan frecuencias mayores.

Ejemplo: Cuál será la más pequeña discontinuidad que podría encontrarse en un material de acero con una velocidad de 6 Km/seg. , usando un transductor con una frecuencia de 3 MHz.

Solución:

De la ecuación (1.1):

$$\lambda = \frac{6 \times 10^3 \text{ m/seg}}{3 \text{ MHz}} = 2 \text{ mm}$$

Si el más pequeño defecto detectable es $1/2 \lambda$, entonces la respuesta es 1mm.

1.9 El haz ultrasónico

Este haz no es totalmente recto. Si se mide la intensidad del haz sonoro a varias distancias del transductor, se observa que es posible distinguir tres zonas diferentes, tal y como se muestra en la Figura 1.12. Estas zonas son conocidas como: zona muerta, zona de campo próximo (Zona de Fresnel) y zona de campo lejano (Zona de Fraunhofer).

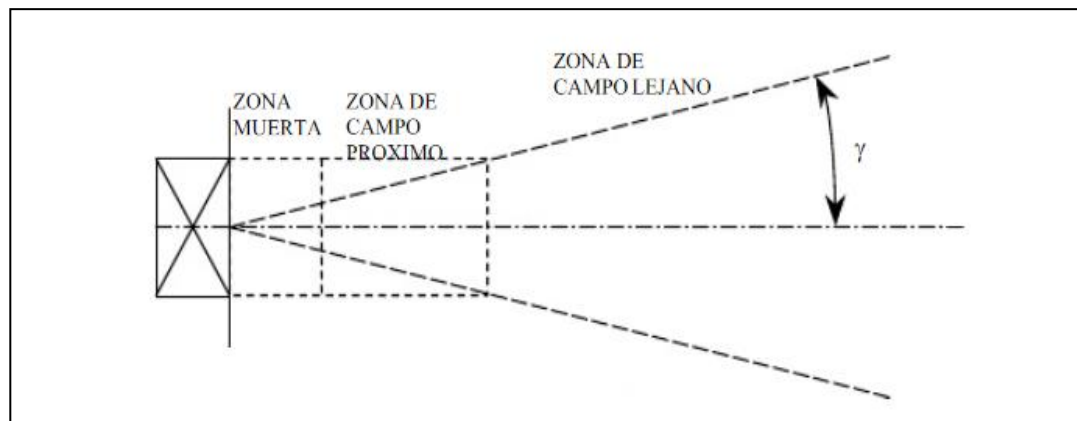


Figura 1.12: Zonas del haz ultrasónico.

La intensidad del Ultrasonido, no es uniforme a lo largo del haz, debido al tamaño limitado de la fuente (oscilador), que da lugar a los efectos de la difracción. La zona muerta, se debe a la interferencia producida por las vibraciones del cristal oscilador y su presencia en el haz y está determinada por el tiempo de oscilación. Recibe este nombre, porque cualquier discontinuidad presente en esta, será totalmente ignorada durante el tiempo de oscilación del cristal, debido a que la presión acústica del haz es nula en toda su profundidad. En la proximidad al oscilador, hay extensas fluctuaciones, ocasionando un campo con máximos y mínimos de presión acústica; es decir un fenómeno de interferencia del campo ultrasónico, conocido como campo próximo (Zona de Fresnel). Debido a las variaciones dentro del campo próximo, puede ser sumamente difícil evaluar con precisión las fallas que se encuentran en este sector de los materiales. La relación

entre el diámetro del oscilador “D” y la longitud de onda “λ”, determina la extensión del campo de interferencia y el número de máximos y mínimos de presión acústica. Para osciladores circulares, la longitud del campo próximo se puede calcular de forma precisa mediante la expresión:

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (1.18)$$

Cuando la longitud de onda es pequeña comparada con el diámetro del oscilador (D), la expresión (1.18) se simplifica, donde R y S son el radio y la superficie del oscilador respectivamente.

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{R^2}{\lambda} = \frac{S}{\pi\lambda} \quad (1.19)$$

Para los osciladores de cristal rectangular, se tiene la siguiente fórmula para el cálculo del campo próximo:

$$N = \frac{f}{\pi \cdot c} \cdot (a^2 + b^2) \cdot \left(1 - \frac{a}{2b}\right) \quad (1.20)$$

Donde: f = frecuencia, a = lado mayor, b = lado menor, c = velocidad del sonido en el material de prueba.

En la dirección de propagación de la onda existe el último máximo localizado en el eje, es decir, el máximo principal (Figura 1.13). Este último máximo de presión acústica determina el fin del campo próximo, en contraste con el campo continuo libre de interferencia denominado campo lejano (Zona de Fraunhofer), donde el haz ultrasónico es más uniforme. La transición entre estas zonas ocurre a la distancia “N”, llamada también el "foco natural" debido a que las líneas de dispersión del haz se extienden hacia

fuera, dando lugar a una apertura del campo ultrasónico, como se muestra en la Figura 1.13, con las rectas partiendo desde el centro del oscilador, determinando en el centro del haz el eje acústico. El ángulo formado por una de esas rectas con el eje del oscilador es el semiángulo de apertura o ángulo de semidivergencia “ γ ”. De acuerdo con la teoría de la difracción, este ángulo viene dado por:

$$\text{Sen } \gamma = K \left(\frac{1.22\lambda}{D} \right) \quad (1.21)$$

Siendo K una constante que depende del cristal a utilizar; si se conoce el valor de K y el valor de la relación D/λ , se obtiene directamente el ángulo de semidivergencia. La presión acústica a lo largo del eje del oscilador, varía entre cero y el doble de la presión media P_0 . La sección transversal, al final del campo próximo, muestra sólo un máximo cuyo valor es el doble que el valor inicial P_0 . La presión calculada a partir de N y a grandes distancias resulta ser:

$$P = P_0 \left(\frac{S}{d\lambda} \right) \quad (1.22)$$

Donde: S = Superficie del cristal oscilador y d = distancia desde el foco.

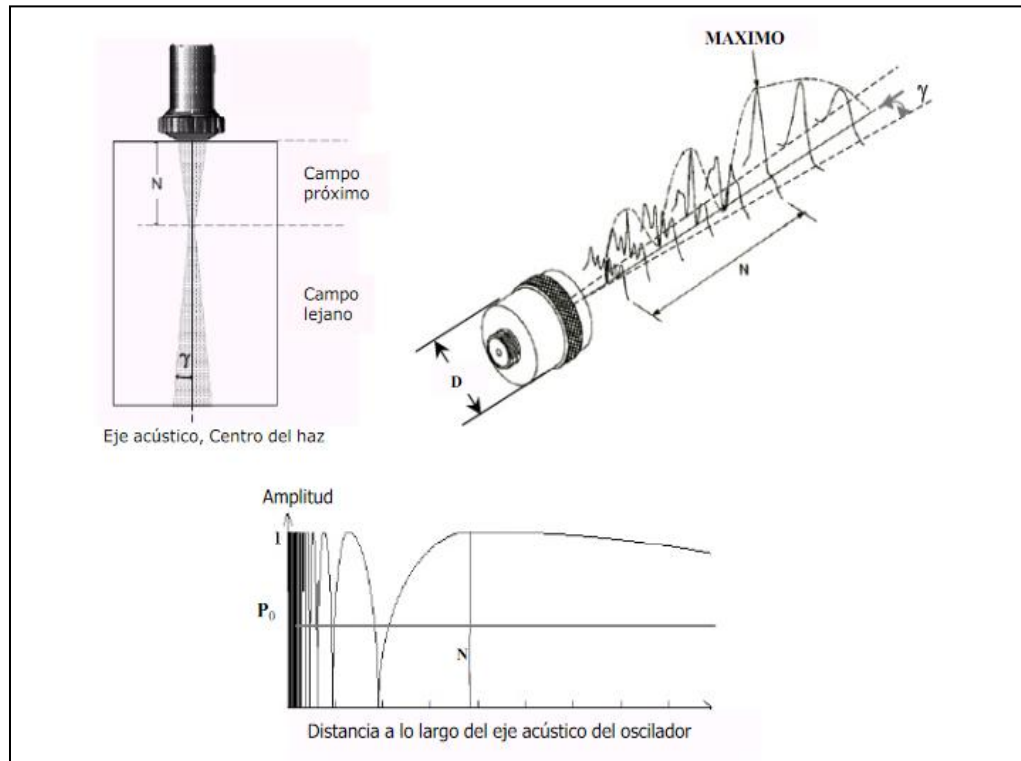


Figura 1.13: Campo cercano y lejano de un generador de ultrasonidos.

1.10 Método de prueba y técnica de inspección

Se tienen diversas técnicas para la inspección no destructiva con ultrasonidos. Por un lado si se tiene en cuenta el tipo de acoplamiento acústico entre el transductor y la pieza de ensayo se distingue: el método por contacto y el método por inmersión. Además se distinguen dos técnicas de inspección que son: pulso- eco (Utiliza un único transductor que emite y recibe) y transmisión (Utiliza dos transductores, uno emite y el otro recibe). Este informe se basa en el método por contacto, con la técnica de pulso -eco.

En el método por contacto, aplicando la técnica de pulso – eco, se utiliza un solo transductor para emitir y para recibir las ondas ultrasónicas. Los pulsos son emitidos en forma repetitiva. Se emplea en el 90% de los casos. Según este método, el transductor se sitúa sobre la superficie de la pieza a examinar, aplicando además, entre el transductor y la pieza, un acoplante para favorecer la transmisión de las ondas ultrasónicas en el material. Para realizar correctamente la inspección se ha de ejercer una presión constante sobre el transductor, cuando este se mueve a través de la superficie. Para incidencia normal (Figura 1.14), la dirección que recorre la onda ultrasónica, es la del espesor de la pieza, formando 90° , con la superficie y siendo 0° , el ángulo de incidencia.

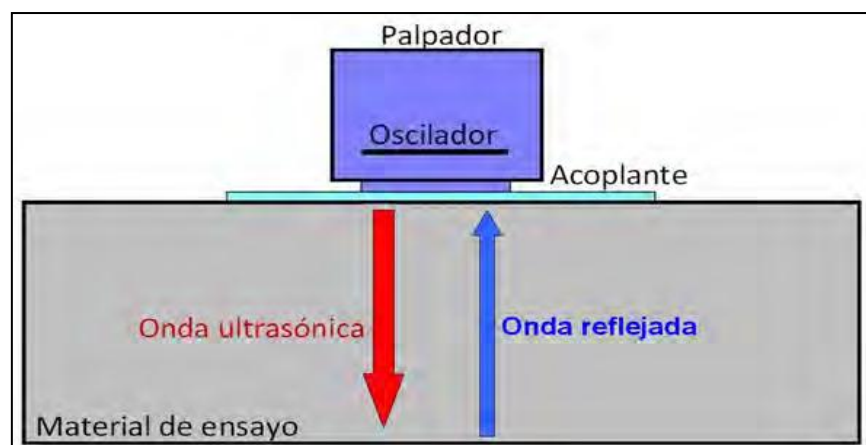


Figura 1.14: Método por contacto con incidencia normal.

Cuando la incidencia es angular (Figura 1.15) , el ángulo de incidencia de la onda ultrasónica depende del ángulo de refracción del haz en el material que, a su vez, queda determinado por los ángulos críticos, puesto que ha de ser mayor que el primer ángulo crítico y menor que el segundo.

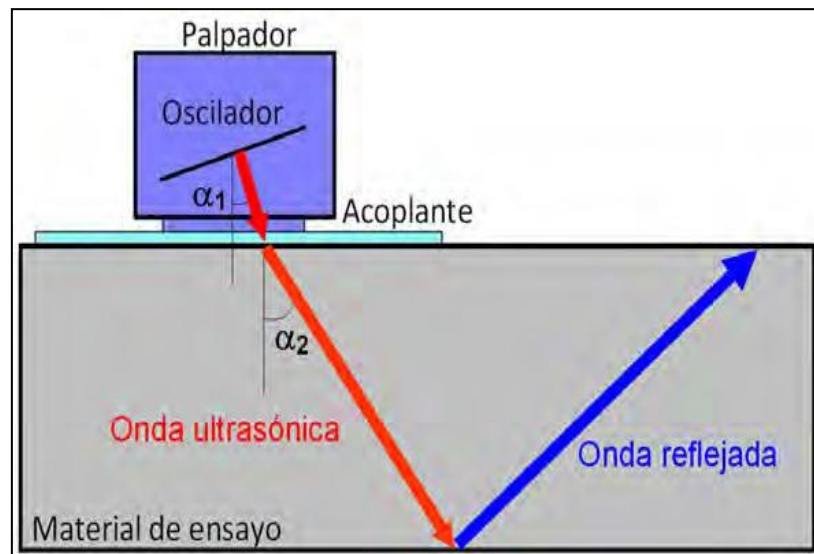


Figura 1.15: Método por contacto con incidencia angular.

Existen además otros factores que afectan a la transmisión del ultrasonido a través de la superficie del material: el acabado superficial; las características del cristal (frecuencia de trabajo y diámetro); y el medio de acoplamiento, los cuales se explican a continuación:

Acabado superficial: La rugosidad superficial y superficies con pintura mal adherida, óxido o corrosión, pueden alterar los resultados o evitar que se realice una inspección completa. Las consecuencias de la existencia de rugosidad superficial son las siguientes: disminuye la transmisión de la presión acústica, aumenta el ancho de la zona muerta, y puede cambiar la dirección del haz ultrasónico.

Características del cristal: En principio, para favorecer la transmisión de la onda ultrasónica a través de la superficie que se está examinando, conviene una disminución de la frecuencia de excitación del oscilador y un aumento del diámetro del cristal piezoeléctrico. Aunque, para elegir el tamaño del cristal, también influye el acabado superficial de la pieza de ensayo.

Medio de acoplamiento: En la técnica de contacto se utilizan acoplantes porque el aire no transmite la onda ultrasónica debido a que su impedancia acústica es muy diferente a la de los materiales sólidos. Por tanto, para originar una adecuada transmisión de la onda se necesita una fina capa de material transmisor acústico. De entre los acoplantes más usuales se encuentran el agua, la glicerina, multigelos, etc.

Finalmente, y teniendo en cuenta todos estos factores, la técnica de contacto consiste en apoyar y mover el transductor sobre la superficie ejerciendo cierta presión, a la vez que se observan las indicaciones en el aparato de ultrasonido, las cuales mostrarán en qué puntos del material se encuentran posibles heterogeneidades, teniendo en cuenta qué porción de la onda ultrasónica emitida se refleja.

Las ventajas que tiene la técnica de contacto directo sobre otras son: tiene buena portabilidad, porque se puede ubicar el equipo donde se necesite; tiene alto poder de penetración, por lo que tiene posibilidad de inspeccionar piezas de gran espesor.

Las limitaciones son: la superficie del material ha de ser uniforme para que pueda haber un acoplamiento perfecto entre pieza y el transductor; si la superficie no es totalmente uniforme se producen pérdidas de sensibilidad, lo que deriva en resultados heterogéneos que producen una pérdida de fiabilidad del método; se tienen dificultades con el uso de acoplantes pesados, con los que se hace difícil limpiar la superficie de ensayo; pueden encontrarse dificultades en la detección de defectos cerca de la superficie, debido a la presencia de la zona muerta y la del campo cercano.

1.11 El aparato de ultrasonido

Contiene circuitos electrónicos especiales, que permiten transmitir al cristal piezoeléctrico por medio de un cable coaxial, una serie de pulsos eléctricos controlados, transformando los mismos en ondas ultrasónicas.

El sonido reflejado hacia el transductor, es convertido en pulsos eléctricos, los cuales son amplificados y visualizados en el tubo de rayos catódicos (CTR), como pulsos verticales. El display, A-Scan, indica la profundidad y la amplitud de la reflexión desde una discontinuidad.

El aparato de ultrasonido, esta constituido por ciertas partes importantes, los cuales son enunciados a continuación:

Selección de las funciones : Todo tipo de aparato posee dos entradas de conectores tipo BNC (procedencia americana) o Lemo (procedencia alemana), para permitir la utilización de transductores mono-cristal y doble cristal.

Control de Ganancia: Está relacionado con la amplitud de la señal en la pantalla o amplitud de la señal recibida por el cristal. En general los aparatos presentan niveles de ganancia a través de una llave selectora de número de 2 hasta 6 posiciones.

Posicionador (Delay): Consiste en un control que desplaza el punto cero con la finalidad de discriminar las señales emitidas debido a la zona de transferencia del sonido desde el transductor a la cuña.

Escala: Las graduaciones en la pantalla del aparato, pueden ser modificadas conforme a las necesidades, por lo tanto el control selector de escalas son valores fijos, ejemplo: 10, 50, 100, 250 mm.

Control de Velocidad: Este control tiene la finalidad de ajustar la velocidad de desplazamiento de la onda en el material inspeccionado. Este ajuste es obtenido mediante la calibración del equipo.

Cero: Consiste en un control que descoloca todos los ecos existentes en la pantalla. Tiene la finalidad de posicionar a la escala deseada, además de auxiliar a la calibración.

Freezer: Es un control de congelamiento de imagen para un mejor análisis de las reflexiones causadas por alguna indicación y a la vez para permitir el almacenaje de las inspecciones en la memoria del equipo.

Batería: Todo equipo de ultrasonido debe tener en el panel un indicador de las condiciones de carga de la batería, pues muchas baterías son recargables y se requiere ciertos cuidados con el tiempo de uso de la recarga.

Existen tres tipos básicos de presentación de resultados, que pueden ser comúnmente utilizados para evaluar la calidad de un material bajo prueba: A-Scan, B-Scan y C-Scan. Este informe, se basa en la representación, A-Scan, el cual se detalla a continuación.

La representación Tipo A (A- Scan), se obtiene una representación, donde, en la escala horizontal, se tiene el tiempo y, en la escala vertical, la amplitud de la señal reflejada (Figura 1.19). Normalmente se obtiene una imagen rectificadas del eco. Mediante la imagen A-Scan, se puede obtener información acerca de las dimensiones de la heterogeneidad, la profundidad a la que se encuentra, la divergencia del haz ultrasónico y otras características. También se emplea para determinar los espesores de pared en tuberías, tanques, recipientes u otras estructuras metálicas.

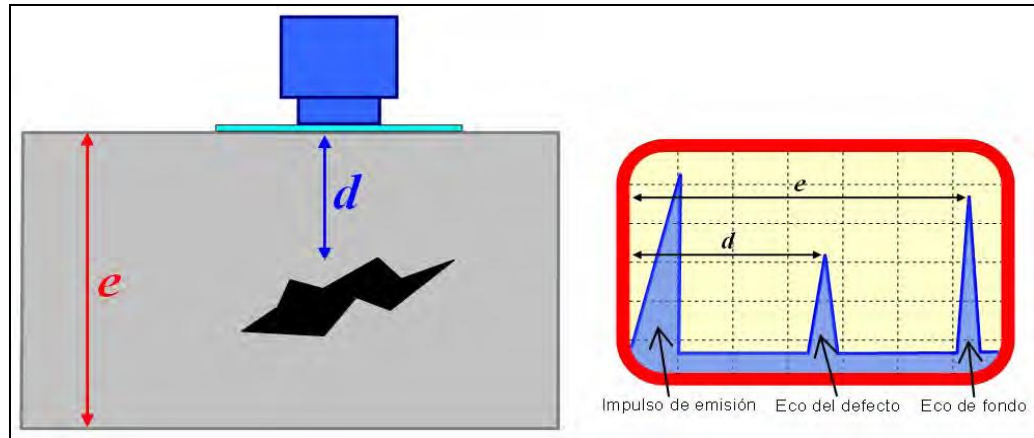


Figura 1.16: Representación A- scan.

1.12 Uso de los transductores de haz angular

Cuando un transductor de haz angular, conectado a un equipo de ultrasonido, se acopla sobre la superficie de una placa, el haz de ondas longitudinales emitido por el cristal del transductor se refracta al atravesar la interfase, convirtiéndose en un haz de ondas de corte. Éste haz se propaga en “zig-zag” a través de la placa como se puede observar en la Figura 1.17.

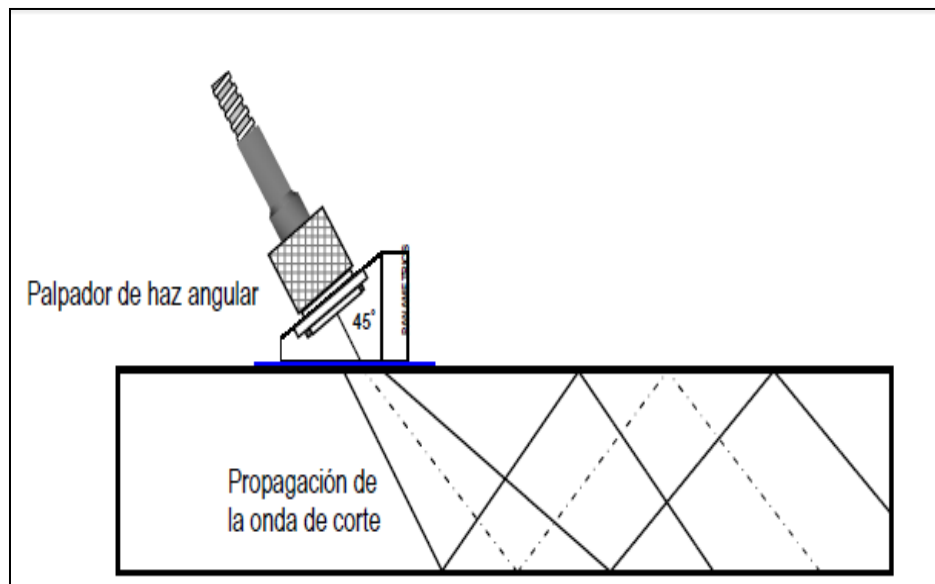


Figura 1.17: Propagación del haz de ondas de corte.

Si en su camino, el haz de ondas de corte, no encuentra ningún reflector con orientación favorable, continuará su propagación a través de la placa y en la pantalla no habrá ninguna indicación, como se ilustra en la Figura 1.18.

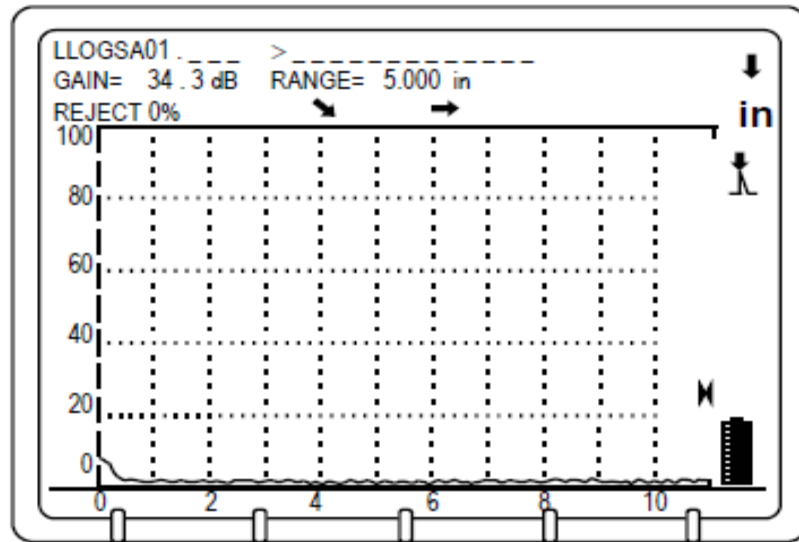


Figura 1.18.: Pantalla del instrumento ultrasónico.

Imaginemos ahora que el haz de ondas de corte incide en el borde de la placa, Figura 1.19. En éste caso, aparecerá un eco en la pantalla, y siempre que el rango elegido en el equipo sea el adecuado, la reflexión se producirá bien cuando el haz incida en la esquina inferior o bien cuando incida en la esquina superior. El eco de máxima altura corresponderá a la reflexión de la parte central del haz en la esquina inferior de la pieza al producirse la primera reflexión. A continuación, los ecos sucesivos, debidos a reflexiones en las esquinas, serán lógicamente de menor amplitud a medida que el transductor vaya alejándose del borde de la placa, puesto que el haz, al tener que recorrer mayor camino, sufrirá una atenuación consiguiente mayor.

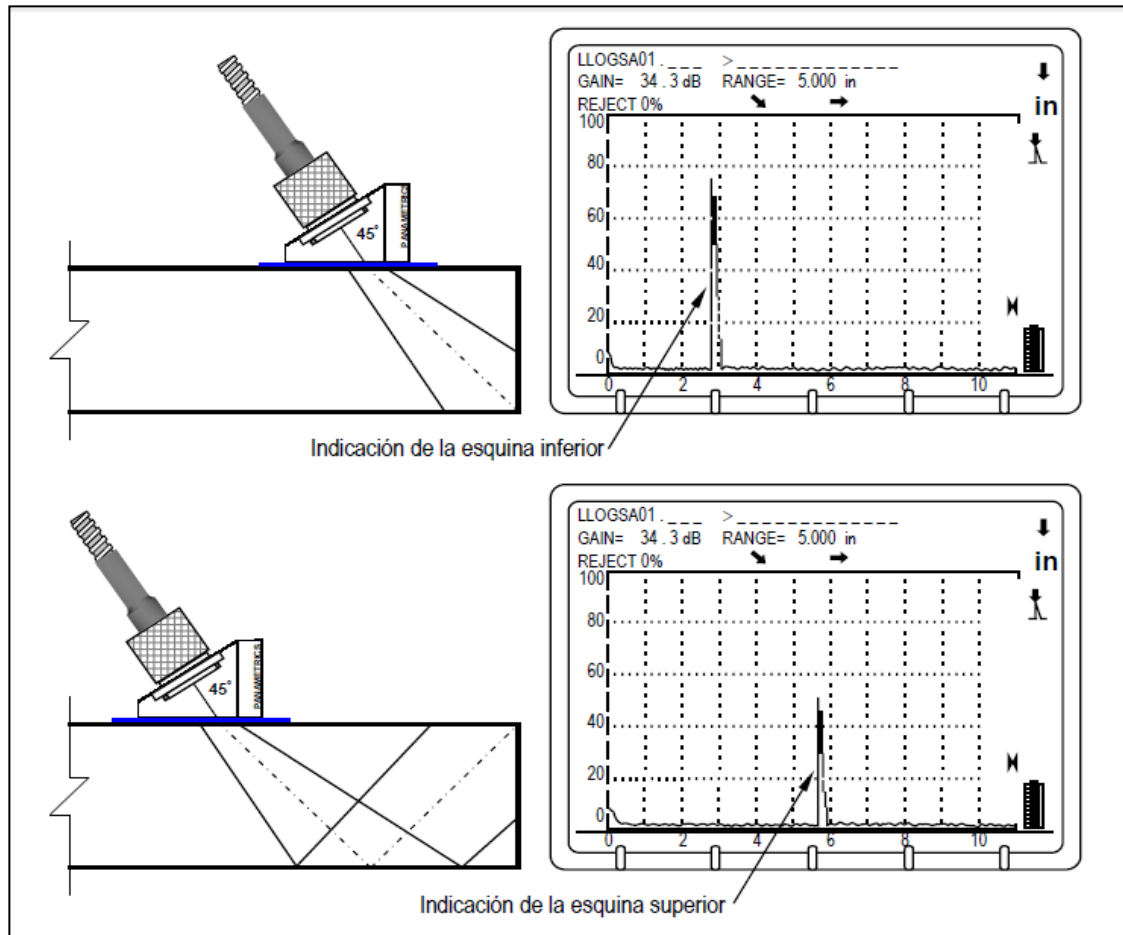


Figura 1.19.: Incidencia del haz angular en el borde de la placa.

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

Como se puede observar en la Figura 1.20, por la forma en “V” del recorrido del haz ultrasónico hasta completar la distancia SD , se le da el nombre de “Trayectoria en V”.

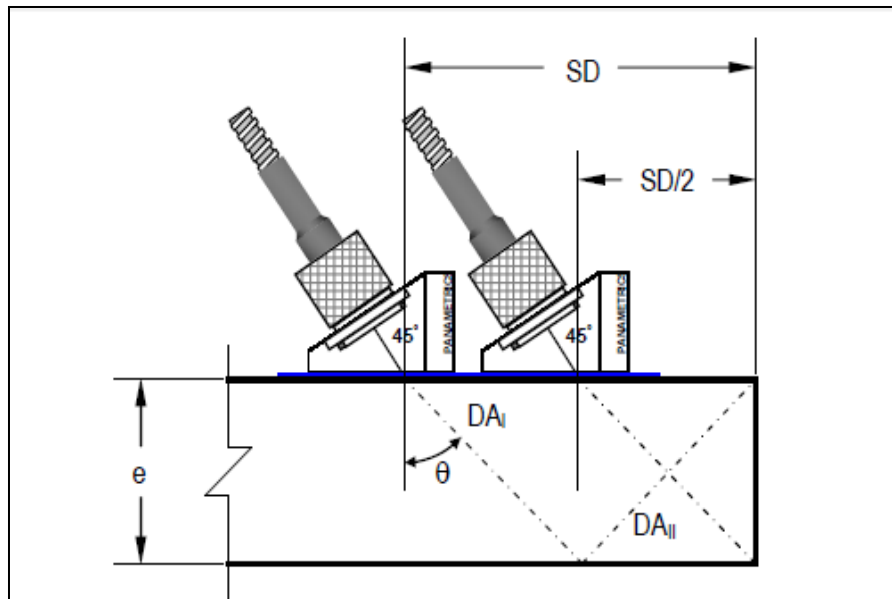


Figura 1.20: Distancia SD y $SD/2$.

La distancia recorrida por el haz ultrasónico, hasta la superficie inferior de la placa (DA_I), se le conoce como la “Primera Pierna” de la trayectoria en “V”, y la distancia desde la superficie inferior hasta la superior (DA_{II}), es la segunda pierna, y así será sucesivamente.

Con base en la Figura 1.20, se puede deducir que, el haz barre toda la sección transversal de la placa al desplazar el transductor entre SD y $SD/2$. A la distancia SD se le denomina “Distancia de salto” (por su nombre en Inglés Skip Distance) y a $SD/2$, “Distancia de medio salto”. Conociendo el ángulo de refracción del haz ultrasónico (θ), marcado en el transductor, y el espesor, se pueden calcular las distancias SD y $SD/2$.

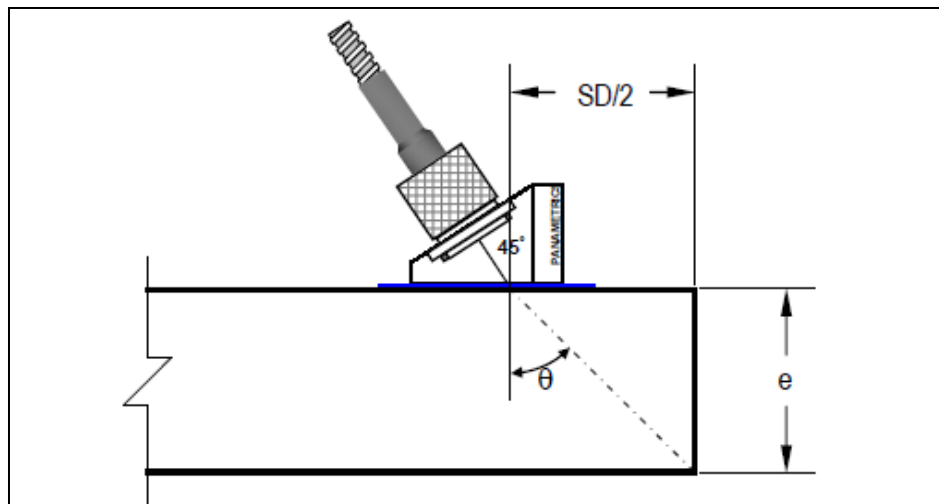


Figura 1.21: Distancia de medio salto.

En efecto, de la Figura 1.21, se deduce que:
$$\text{Tg}\theta = \frac{SD/2}{e}$$

Por lo que despejando:

$$SD = 2 e \text{Tg}\theta \quad (1.23)$$

Los transductores angulares cuentan, para su ángulo de refracción, con el factor $2 \text{Tg}\theta$, por lo cual, el conocer la distancia de salto y de medio salto es cuestión, únicamente, de conocer el espesor de la placa.

Supongamos, que al verificar una placa, con transductor angular, se detecta una discontinuidad, ésta discontinuidad producirá, si es de orientación favorable al haz, una indicación en la pantalla del equipo, como se ilustra en la Figura 1.22. Consideremos que la posición de la discontinuidad dentro de la placa es indicada en la pantalla del equipo, si el equipo ha sido calibrado en recorrido del haz, podemos conocer, sin más que leer directamente en la pantalla, la distancia angular (DA) ,a la que se encuentra la discontinuidad.

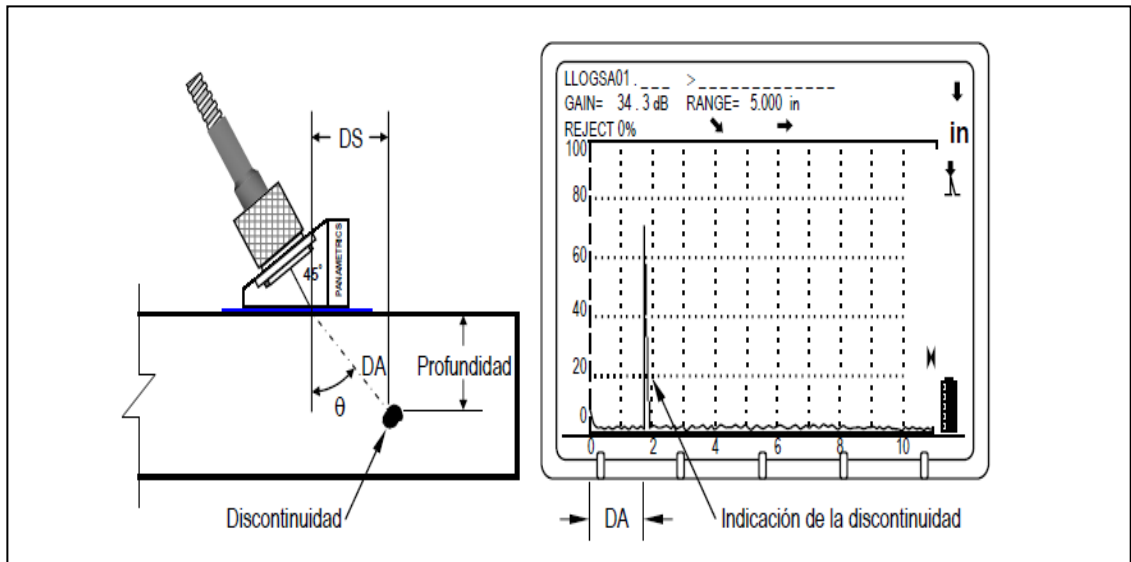


Figura 1.22: Detección de una discontinuidad.

Ahora bien, recurriendo a expresiones trigonométricas sencillas tendremos que:

$$\text{Sen}\theta = \frac{DS}{DA} \quad \text{y} \quad \text{Cos}\theta = \frac{\text{Profundidad}}{DA}$$

Por lo tanto:

$$DS = DA \text{ Sen } \theta \quad (1.24)$$

$$\text{Profundidad} = DA \text{ Cos } \theta \quad (1.25)$$

Donde: DS = Distancia superficial; DA = Distancia angular y θ = Ángulo de refracción

Como el ángulo θ , es conocido, puesto que es el ángulo de entrada del haz, podremos determinar la distancia superficial a la cual se encuentra la discontinuidad, medida sobre la superficie de la placa, así como la profundidad.

Consideremos ahora que la discontinuidad se localiza después de una reflexión del haz en la superficie inferior de la placa, Figura 1.23; observando en la pantalla del equipo, veremos que la distancia angular a la que aparece la discontinuidad es lógicamente mayor.

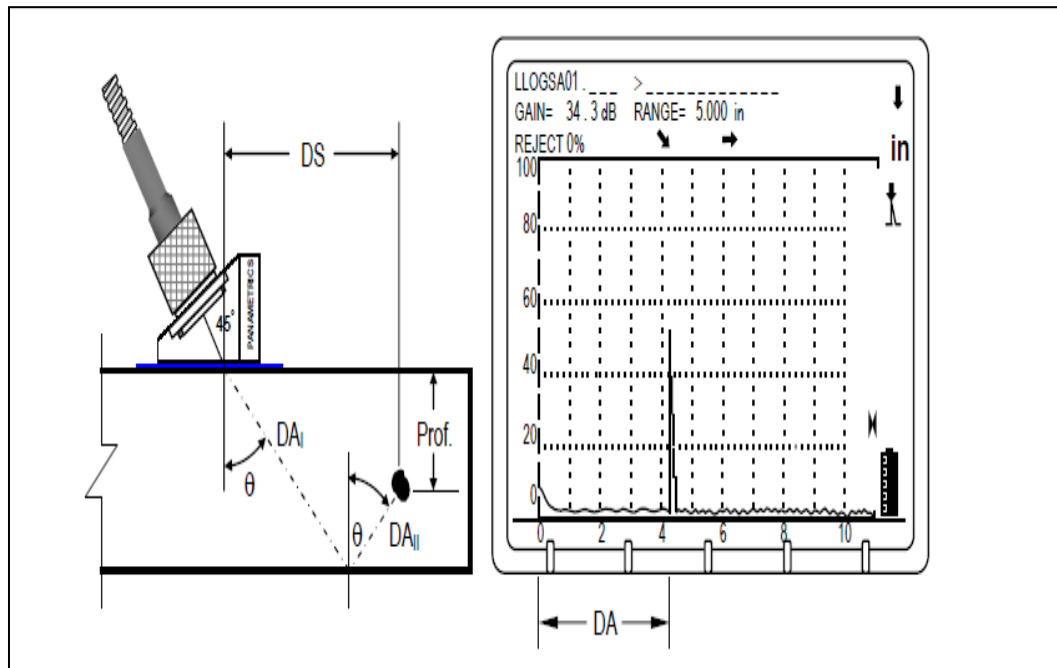


Figura 1.23: Detección de una discontinuidad con la segunda pierna.

Para este caso se deduce que: $DS = DA \text{ Sen } \theta$ (Igual que el caso anterior) y
 Profundidad = $2.e. (DA_I + DA_{II}) .\text{Cos } \theta$

Por lo tanto:

$$\text{Profundidad} = 2e - (DA_T .\text{Cos } \theta) \quad (1.26)$$

Donde: e = Espesor de la placa; DA_T = Distancia angular total ($DA_I + DA_{II}$) y
 θ = Ángulo de refracción.

1.13 Inspección de soldaduras por ultrasonido

Antes de abordar la inspección de un determinado cordón de soldadura, todo operario en ultrasonido debe conocer ciertos puntos. Informarse sobre estas cuestiones puede suponerle al operario una gran ayuda para realizar el examen. Veamos a continuación que puntos son estos y como pueden influir en el control ultrasónico su conocimiento:

Material a inspeccionar: Conocer el tipo de material puede ayudar a saber si, en las zonas adyacentes al cordón, va a encontrarse estructura de grano grueso o fino, lo que podría determinar la frecuencia a emplear.

Espesor de placa: Saber cuál es el espesor de la placa es siempre muy importante, pues, aparte de ayudar en la elección del ángulo del transductor a emplear, sirve para conocer las distancias de salto y de medio salto entre las cuales ha de desplazar el transductor durante la ejecución de la inspección.

Preparación de las uniones del cordón: Conocer la preparación de la unión ayuda de forma muy considerable a la hora de interpretar las discontinuidades. Así, por ejemplo, si el cordón lleva preparación en “X” y la posible falta de penetración que pudiera tener este cordón, se encuentra en el centro del mismo, es decir, entre las pasadas de la raíz de uno y otro lado.

Procedimiento de soldadura utilizado: El conocimiento de que procedimiento de soldadura se ha empleado es de gran importancia para determinar cuáles son las discontinuidades que, con mayor seguridad, se pueden encontrar. Así, el cordón se ha soldado con el procedimiento CO₂, se sabe de antemano que no va a encontrar inclusiones de escoria, pues el electrodo va protegido con gas y debe, en cambio, tener en cuenta que en este tipo de soldadura las discontinuidades más frecuentes son porosidad y faltas de fusión entre otras.

Si la soldadura ha sufrido algún tratamiento térmico o no: A veces, en ciertos tipos de cordones, es necesario realizar tratamientos térmicos posteriores a la soldadura. Estos tratamientos pueden originar cambios en la estructura de grano del cordón, lo cual puede influir sobre la elección de la frecuencia del transductor.

Existencia de respaldo de soporte en la raíz del cordón: Por último, en la raíz de algunos cordones, se sujeta con soportes de respaldo (por ejemplo en ciertas uniones de tubos). El operario debe esperar, casi con seguridad, ecos debidos a reflexiones en los mencionados respaldos, lo que ha de tener en cuenta a la hora de dilucidar si un eco procedente de la raíz, es de una discontinuidad real, o bien de dichos respaldos.

CAPITULO II

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE ULTRASONIDO

2.1 Requerimientos generales

El procedimiento de ultrasonido descrito, es el que corresponde a la evaluación de soldaduras con penetración completa de juntas a tope en componentes no tubulares, en estructuras de acero de alta y baja aleación , entre los espesores de 8 y 200 mm , según el código AWS D1.1/D1.1M – 2010, Sección 6 - Parte F.

Los inspectores para poder realizar este ensayo, serán entrenados y calificados como Nivel I ó II, de acuerdo con los requisitos de la ASNT, procedimiento SNT-TC-1A (Ver en Anexo 1, el certificado Nivel II en ultrasonido). Cada operador calificado debe de realizar las actividades que son compatibles con su nivel de calificación.

Las superficies que serán ensayadas (superficie del metal base adyacente a la soldadura), deberán presentar condiciones adecuadas de modo que no interfieran con la ejecución del ensayo, es decir la superficie de contacto entre el transductor y la pieza debe de estar limpia y libre de rugosidades excesivas, ondulaciones, óxidos, salpicaduras de soldaduras y pinturas, etc. Si fuera necesario las superficies podrán ser esmeriladas, escobilladas, raspadas, o preparadas de alguna forma para ejecutar el ensayo. Deberá de haber una concordancia suave entre el metal base y el cordón de soldadura, cuando fuera necesario un acoplamiento sobre el cordón de soldadura, el refuerzo de la misma deberá

ser totalmente removido. El estado de la habilitación de las superficies del ensayo debe ser indicado en los reportes de inspección por ultrasonido.

Como acoplante entre la superficie de la pieza y el transductor se utiliza una base de metil-celulosa diluida en agua.

Se utiliza, equipos de ultrasonido del tipo pulso-eco, según se describe a continuación.

Tabla 2.1: Equipos de ultrasonido

FABRICANTE	MODELO
SONATEST	SITESCAN 150
SONATEST	MASTERSCAN 333
GE Inspection Technologies	USN60
GE Inspection Technologies	Krautkramer Phasor XS
GE Inspection Technologies	USM Go

Se utilizan transductores de ondas longitudinales acoplados a zapatas angulares y transductores para inspección con haz normal listados en la siguiente tabla:

Tabla 2.2: Transductores de haz normal y angular

Marca	Modelo	Tipo	Diámetro	Ángulo	Frecuencia
TECHNISONIC (*)	ABS-020505- AWS	Normal	0.62"x 0.62"	0°	2.25 MHz
TECHNISONIC	C-0208-HR	Normal	1.0"	0°	2.25 MHz
GENERAL ELECTRIC	B2S	Normal	24mm	0°	2.0 MHz

(*) transductores de haz normal para ser acoplados a zapatas angulares de 70°, 60° y 45° de acuerdo a los requerimientos del espesor inspeccionado.

2.2 Calibración del equipo de ultrasonido

Todas las calibraciones y pruebas serán hechas con el control de rechazo (truncamiento o supresión) apagado. El uso del control de rechazo puede alterar las linealidades de la amplitud del instrumento e invalidar los resultados de la prueba.

La calibración para la sensibilidad y el recorrido horizontal (distancia), será hecha por el operador de UT, justo antes y en la ubicación de la prueba de cada soldadura.

La re-calibración, será hecha después de un cambio de operadores, cada dos horas de intervalo máximo de tiempo, o cuando el circuito eléctrico es perturbado de la siguiente manera: se cambia el transductor, se hace un cambio de la batería, se cambia el enchufe eléctrico., se cambia el cable coaxial o se produce una interrupción de la energía.

2.2.1 Calibración para el ensayo con haz normal

La calibración para la prueba con haz normal del metal base, será hecha con la unidad de búsqueda aplicada a la cara de barrido del metal base y realizada como sigue:

Para la calibración de la distancia, el recorrido horizontal de la pantalla, será ajustado según la distancia de calibración, como equivalente usaremos como mínimo el valor del doble del espesor de la plancha en la pantalla del aparato de ultrasonido. La calibración se realiza utilizando el patrón de calibración del IIW (ver Figura 2.1), de la siguiente manera: el transductor será fijado en la posición G, respecto al patrón del IIW. Luego el instrumento será ajustado para producir indicaciones a 1", 2", 3", 4", etc. en la pantalla del equipo de ultrasonido.

Para el caso de la amplitud (sensibilidad), el transductor será fijado en la posición G, respecto al patrón del IIW (Ver Figura 2.1). La ganancia será ajustada hasta que la

indicación maximizada a partir de la primera reflexión de fondo alcance de 50% a 75% de altura de la pantalla.

Para el caso de la resolución, el transductor será fijado en la posición F, respecto al patrón del IIW (ver Figura 2.1) .El transductor y el instrumento deberán distinguir las tres distancias.

La linealidad horizontal del equipo de ultrasonido será re-calificada, luego de cada dos meses de uso del instrumento, en cada uno de los rangos de distancia en el que el equipo será utilizado.

El control de ganancia del equipo, deberá cumplir con los requisitos dados para el uso del equipo respecto a sus ajustes y su calibración correcta, deberá ser comprobada en intervalos de cada dos meses.

2.2.2 Calibración para el ensayo con haz angular

La calibración para la prueba con haz angular, para la inspección de soldaduras, es realizada como sigue:

El punto de salida del haz desde el transductor (Index Point), será localizado o verificado por el procedimiento siguiente: el transductor será colocado en la posición D ,respecto al patrón del IIW (ver Figura 2.1) ; luego el transductor será movido hasta ubicar la máxima reflexión del pico originada por la superficie curva del bloque patrón. El punto en el transductor donde se alinea con la línea del centro de la curvatura del patrón de calibración, es el punto de salida del haz.

El ángulo de la trayectoria del sonido del transductor será comprobado o determinado por uno de los procedimientos siguientes: el transductor será fijado en la posición B,

respecto al patrón del IIW , para los ángulos de 40° hasta 60°, o en la posición C respecto al patrón del IIW , para los ángulos de 60° hasta 70° ,(ver Figura 2.1). Para el ángulo seleccionado, el transductor será movido hacia adelante y hacia atrás sobre la línea indicativa del ángulo del transductor, hasta que la señal de la indicación en la pantalla se maximice. El punto de salida del haz (Index Point), en el transductor será comparado con la marca del ángulo en el patrón de calibración (tolerancia $\pm 2^\circ$).

El recorrido horizontal, será ajustado para representar la distancia real de la trayectoria del sonido usando el patrón del IIW, o patrones alternativos aprobados. La calibración de la distancia, será hecha, usando ya sea escalas de 5” ó 10“, en la pantalla del equipo de ultrasonido, cualquiera que sea la más apropiada. Sin embargo, si la configuración de la junta o el espesor evita la exanimación completa de la soldadura con cualquiera de estos ajustes, la calibración de la distancia será hecha usando escalas de 15“ó 20”, según sea lo requerido. El transductor será fijado en la posición D, respecto al patrón del IIW (para cualquier ángulo). El instrumento entonces será ajustado para lograr indicaciones en 2” y 4”, en la pantalla.

Para la calibración de la sensibilidad, el transductor será fijado en la posición A, respecto al patrón del IIW (para cualquier ángulo). La máxima señal de la indicación originada por el agujero de diámetro 0.060”, deberá ser ajustada, para lograr una indicación a la altura del nivel de referencia deseada. La lectura en decibeles obtenida para llevar la indicación a esta altura será utilizada como el nivel de referencia (b).

Para el caso de la resolución, el transductor será fijado en la posición Q, del Patrón de resolución RC, para el ángulo de 70°; la posición R, para el ángulo de 60°; o la posición S, para el ángulo de 45°. El transductor y el instrumento deberán distinguir los tres agujeros de prueba, por lo menos al grado de distinguir los picos de las indicaciones de los tres agujeros.

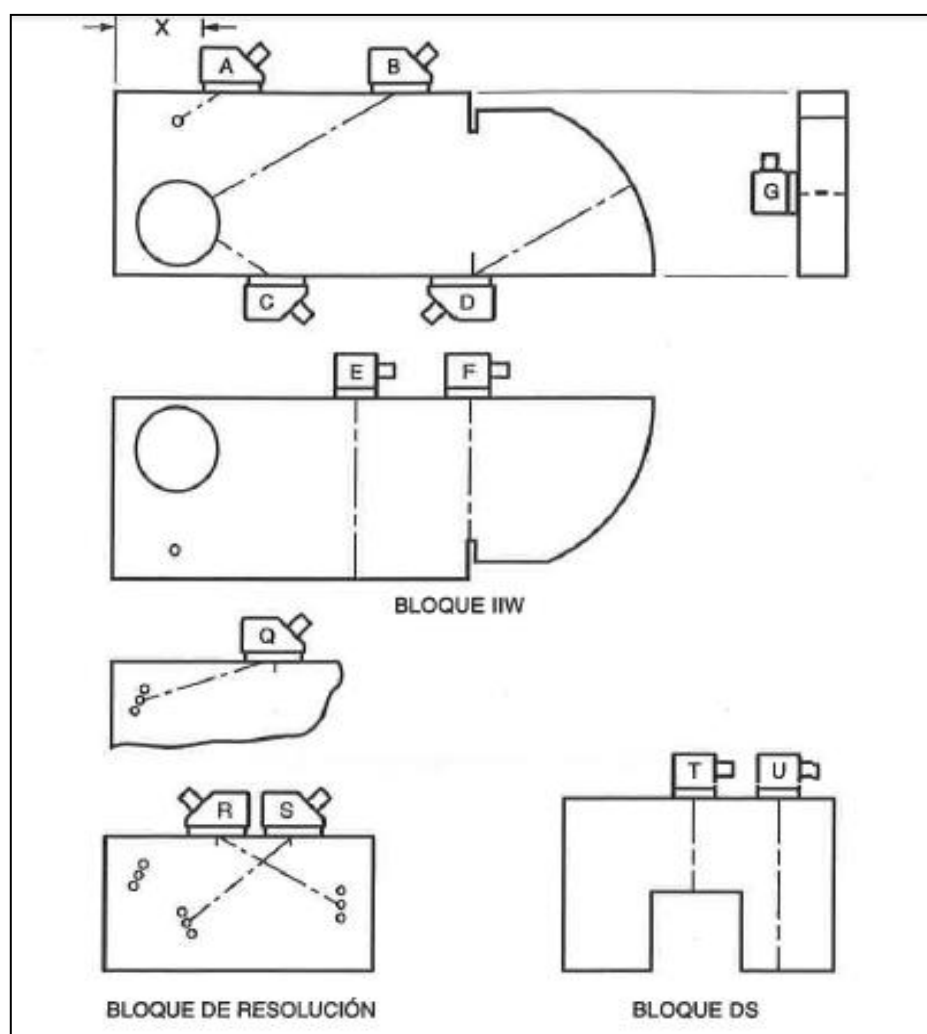


Figura 2.1: Posiciones del transductor para realizar la calibración del equipo.

2.3 Técnica operacional del ensayo

Todo metal base a través del cual, el ultrasonido viaja para evaluar una soldadura, deberá ser ensayado para detectar reflectores laminares, mediante el uso de un transductor de haz normal y una correcta calibración. Si alguna área del metal base presenta una total pérdida de la reflexión del fondo o si una indicación igual o mayor que la altura de reflexión de fondo original es localizada en una posición en la cual interfiere con el procedimiento normal de barrido de la soldadura, esto es tamaño, localización y profundidad desde la cara A, se deberá determinar y reportar en el reporte de ultrasonido y deberá ser usado una técnica de barrido alternativo.

El tamaño de discontinuidades laminares no siempre se determina fácilmente, especialmente si estos son más pequeños que el tamaño del transductor. Cuando la discontinuidad es más grande que el tamaño del transductor ocurre conjuntamente una total pérdida de reflexión y una pérdida de amplitud de 6 dB y la medida de la línea central del transductor es usualmente fiable para determinar los bordes de las fallas. Sin embargo la evaluación del tamaño de aquellos reflectores que son más pequeños que el tamaño del transductor, debe hacerse al principio fuera de la discontinuidad con el equipo calibrado y moviendo el transductor hacia el área de la discontinuidad hasta que en la pantalla se observe un cambio de forma de la reflexión. El borde llevado desde el transductor hasta este punto es indicativo del borde de la discontinuidad. Si una parte de la soldadura es inaccesible para realizar el ensayo, debido al contenido laminar, el ensayo deberá ser conducido usando uno o más de los procedimientos alternativos siguientes como sea necesario para lograr la evaluación del fondo de la soldadura: la superficie de la soldadura deberá ser esmerilada, el ensayo deberá ser realizado por las caras A y B, se deberán usar transductores de diferentes ángulos.

Las soldaduras deberán ser ensayadas usando un transductor de haz angular, con el equipo calibrado usando un ángulo adecuado tal como se muestra en la Tabla 2.6 (Tabla 6.7, del código AWS D1.1 – 2010). Durante la calibración y la realización del ensayo, el único ajuste permitido, es el de nivel de la sensibilidad, mediante el mando de la ganancia. El mando de rechazo (reject) deberá estar apagado. La sensibilidad deberá ser incrementada desde el nivel de referencia para el escaneo de la soldadura dependiendo del tipo de carga al cual estará sometido el componente (carga estática o carga dinámica) en acuerdo con las siguientes tablas:

Tabla 2.3: Incremento de sensibilidad para componentes no tubulares sometidos a carga estática (extraída de la Tabla 6.2 del código AWS D1.1-2010).

Niveles de Escaneo/ Exploración	
Trayectoria^b en pulg.[mm]	Referencia por Encima de cero , dB
Hasta 2 -1/2 [65mm]	14
> 2 -1/2 hasta 5 [65-125mm]	19
> 5 hasta 10 [125-250mm]	29
> 10 hasta 15 [250-380mm]	39
^b Esta columna se refiere a la distancia recorrida por el haz , No al espesor del material	

Tabla 2.4: Incremento de sensibilidad para componentes no tubulares sometidos a carga dinámica (extraída de la Tabla 6.3 del código AWS D1.1-2010).

Niveles de Escaneo/ Exploración	
Trayectoria^b en pulg.[mm]	Referencia por Encima de cero , dB
Hasta 2 -1/2 [65mm]	20
>2 -1/2 hasta 5 [65-125mm]	25
>5 hasta 10 [125-250mm]	35
>10 hasta 15 [250-380mm]	45
^b Esta columna se refiere a la distancia recorrida por el haz , No al espesor del material	

El ángulo de ensayo y el procedimiento de escaneo, deberán estar de acuerdo con aquellos mostrados en la Tabla 2.5 y Tabla 2.6.

Tabla 2.5: Selección del procedimiento (extraída de la Tabla 6.7 del código AWS D1.1– 2010).

Tabla de Procedimiento																								
Espesor de Material, pulg. [mm]																								
	5/16 [8]		> 1-1/2 [38]		> 1-3/4 [45]		> 2-1/2 [60]		> 3-1/2 [90]		> 4-1/2 [110]		> 5 [130]		> 6-1/2 [160]		> 7 [180]							
Aplicación	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a						
	1-1/2 [38]	1-3/4 [45]	2-1/2 [60]	3-1/2 [90]	4-1/2 [110]	5 [130]	6-1/2 [160]	7 [180]	8 [200]															
	*	*	*	*	*	*	*	*	*															
<u>Junta a Tope</u>	1	0	1	F	1G	0	F	0	F	0	F	0	F	0	F	0	F	12	F					
					4			5		6		7		8		9		10		11		12		13

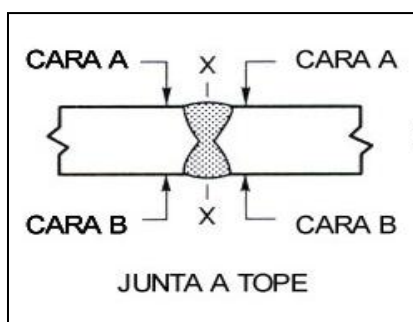


Tabla 2.6: Selección de los ángulos de ensayo (extraída de la Tabla 6.7 del código AWS D1.1 – 2010).

Leyenda de procedimientos			
Area del espesor de la soldadura			
No.	Cuarto superior	Mitad Central	Cuarto inferior
1	70°	70°	70°
2	60°	60°	60°
3	45°	45°	45°
4	60°	70°	70°
5	45°	70°	70°
6	70°G A	70°	60°
7	60° B	70°	60°
8	70°G A	60°	60°
9	70°G A	60°	45°
10	60° B	60°	60°
11	45° B	70°**	45°
12	70°G A	45°	70°G B
13	45° B	45°	45°
14	70°G A	45°	45°
15	70°G A	70°A B	70°G B

Leyendas	
X	Ensayar desde la Cara “C”.
G	Cara de soldadura amolada al ras
O	No requerida
Cara A	La cara del material desde el cual se realiza el barrido inicial (en las juntas T o Esquina, L) , seguir los esquemas de arriba.
Cara B	Opuesta a la cara “A” (La misma chapa).
Cara C	La cara opuesta de la soldadura en el miembro que conecta o una junta T o L
*	Se requiere solo donde se nota la altura de la indicación de referencia de discontinuidad en el monitor en la interfase metal de soldadura – metal base mientras se busca en el nivel de inspección con los procedimientos principales, seleccionados de la primera columna.
**	Usar distancia de calibración de monito de 400mm y 500mm
P	Se utilizara la técnica con dos palpadores, emisor y receptor, para una evaluación adicional de discontinuidades únicamente en la mitad central del espesor del material solo con palpadores de 45 gados o 70 gados de igual especificación, ambos de cara a la soldadura. (Los palpadores deben ser mantenidos en un elemento de fijación para control de posición – ve esquema). La amplitud de calibración para emisión y recepción se hace normalmente en un único equipo. Cuando se cambia a palpadores duales para la inspección de emisión y recepción, se debe asegurar que esa calibración no cambie como resultado de las variables del instrumento.
F	Las indicaciones de la interfase metal de soldadura – metal base deberán ser evaluadas ulteriormente tanto con transductores de 70, 60 , 45 gados – aquel donde la trayectoria del haz este mas ceca ósea perpendicular a la sección de fusión sospechada.

Cuando una indicación debido a una discontinuidad aparece en la pantalla, la máxima indicación obtenida de la discontinuidad, será ajustada para alcanzar el nivel de referencia horizontal (b) del pico en la pantalla. Este ajuste será hecho con el control calibrado de la ganancia, y la lectura de los decibeles necesarios para alcanzar el nivel de referencia horizontal en el aparato de UT, dicho ajuste de decibeles será utilizado como el nivel de la indicación (a), para calcular la clasificación de la indicación (d).

El factor de atenuación (c), en el reporte del ensayo de UT, será obtenido restando 1" a la distancia del recorrido del sonido y multiplicando el residuo por 2. Este factor será redondeado al valor más cercano en dB. Los valores fraccionarios menores que 1/2dB serán reducidos al nivel más bajo de dB y los de 1/2 dB al incrementarlos al nivel más alto.

La clasificación de la Indicación (d), representa la diferencia algebraica en decibeles entre el nivel de la indicación (a) contra el nivel de referencia (b), con factor de atenuación (c), según lo indicado en la expresión siguiente:

$$a - b - c = d \quad (2.1)$$

El siguiente procedimiento, será utilizado para determinar longitudes de las indicaciones para su respectiva evaluación de acuerdo con los criterios de aceptación aplicables. La longitud de tales indicaciones, será determinada midiendo la distancia entre las localizaciones de la línea central del transductor en donde la amplitud de la indicación cae en 50% (6dB). Esta longitud será registrada bajo "longitud de la discontinuidad" en el reporte del ensayo.

Cada discontinuidad de la soldadura, será aceptada o rechazada, en base al grado de la indicación y de su longitud. En conformidad con la Tabla 2.7, para las estructuras estáticamente cargadas o Tabla 2.8, para estructuras cíclicamente cargada, cualquiera que sea aplicable.

Tabla 2.7: Criterio UT, de aceptación - rechazo, para conexiones no tubulares, sometidos a cargas estáticas (extraída de la Tabla 6.2 del código AWS D1.1-2010)

Tamaño de soldadura ^a en pulg.[mm] y Angulo de Unidad de Búsqueda											
Clase de severidad de Discontinuidad	5/16 hasta 3/4 [8-20]	>3/4 hasta 1-1/2 [20-38]	> 1-1/2 hasta 2- 1/2 [38-65]			> 2-1/2 hasta 4 [65-100]			> 4 hasta 8 [100-200]		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
Clase A	+5& menor	+2& menor	-2& menor	+1& menor	+3& menor	-5& menor	-2& menor	0& menor	-7& menor	-4& menor	-1& 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 0	+4 +3	+6 +5	-2 a 0	+1 +2	+3 +4	-4 a 0	-1 a +3	+2 +3
Clase D	+8 & mayor	+5& mayor	+3 & mayor	+6 & mayor	+8& mayor	+3 & mayor	+3& mayor	+5 & mayor	+3& mayor	+3& mayor	+4& mayor

^a El espesor de la soldadura debe definirse como el espesor nominal del elemento estructural de menor espesor a ser unido

Clase A (discontinuidades grandes)
Cualquier indicación en esta categoría debe ser rechazada (sin tener en cuenta la longitud)
Clase B (discontinuidades medias)
Cualquier indicación en esta categoría que tenga una longitud mayor que 3/4 pulg. [20 mm] debe ser rechazada.
Clase C (discontinuidades pequeñas)
Cualquier indicación en esta categoría que tenga una longitud mayor que 2 pulg. [50 mm] debe ser rechazada
Clase D (Discontinuidades menores)
Cualquier indicación en esta categoría debe ser aceptada sin tener en cuenta la longitud o ubicación en la soldadura.

Tabla 2.8: Criterio UT, de aceptación - rechazo, para conexiones no tubulares, sometidos a cargas dinámicas (extraída de la Tabla 6.3 del código AWS D1.1-2010)

Tamaño de soldadura ^a en pulg.[mm] y Angulo de Unidad de Búsqueda											
Clase de severidad de Discontinuidad	5/16 hasta 3/4 [8-20]	>3/4 hasta 1-1/2 [20-38]	> 1-1/2 hasta 2- 1/2 [38-65]			> 2-1/2 hasta 4 [65-100]			> 4 hasta 8 [100-200]		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
Clase A	+10& menor	+8& menor	+4& menor	+7& menor	+9& menor	+1& menor	+4& menor	+6& menor	-2& menor	+1& menor	+3& 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 & mayor	+11& mayor	+9 & mayor	+12 & mayor	+14& mayor	+6 & mayor	+9& mayor	+11 & mayor	+3& mayor	+6& mayor	+8& mayor

^a El espesor de la soldadura debe definirse como el espesor nominal del elemento estructural de menor espesor a ser unido.

Clase A (discontinuidades grandes)
Cualquier indicación en esta categoría debe ser rechazada (sin tener en cuenta la longitud)
Clase B (discontinuidades medias)
Cualquier indicación en esta categoría que tenga una longitud mayor que ¾ pulg. [20 mm] debe ser rechazada.
Clase C (discontinuidades pequeñas)
Cualquier indicación en esta categoría que tenga una longitud mayor que 2 pulg. [50 mm] en la mitad central o ¾ pulg. [20 mm] en el cuarto superior o inferior del espesor de la soldadura debe ser rechazada
Clase D (Discontinuidades menores)
Cualquier indicación en esta categoría debe ser aceptada sin tener en cuenta la longitud o ubicación en la soldadura.

Cada discontinuidad rechazable, será indicada en la soldadura con una marca, directamente sobre la discontinuidad en su longitud total. La profundidad desde la superficie y la clasificación de la indicación serán anotadas en el metal base cercana al cordón de soldadura defectuosa.

Las soldaduras encontradas inaceptables por UT, serán reparadas por métodos permitidos por la norma. Las áreas reparadas serán reexaminadas por ultrasonido con los resultados tabulados en un formato adicional y la conclusión en el reporte debe indicar rechazado.

Luego de la re-inspección de las zonas reparadas, debe emitirse un informe con el mismo número que el reporte original adicionando la letra "R", seguido de un número que indica las veces de reparación. Debe de registrarse todas las indicaciones conforme a los requerimientos de este procedimiento en la evaluación de resultados. En el Anexo 2, se muestra un informe de ensayo de ultrasonido, según el código AWS D1.1-2010, Anexo M, Planilla M-11.

CAPITULO III

APLICACIÓN DEL ENSAYO DE ULTRASONIDO

3.1 Inspección del material base

Para la construcción de una estructura soldada de acero, se debe de requerir de material de acero, el cual llega a la planta en forma de planchas, y son puestas en un almacén.

Dichas planchas de acero, vienen en diferentes tipos (ASTM A-36, ASTM A-572 GR50, etc.) y dimensiones, como por ejemplo: 25x2400x12000 mm, 25x3000x6000 mm, 32x1500x12000 mm, 32x2400x6000 mm, 38x2400x6000 mm, 50x3000x6000 mm, 50x2400x6000mm, etc. Habiendo mencionado las más utilizadas en parte de mi experiencia.

Las planchas mencionadas anteriormente, antes de ser cortadas y darles las medidas requeridas para la construcción de la estructura; estas deben ser inspeccionadas mediante ensayo de ultrasonido por haz normal para verificar que no exista ciertos defectos que por lo general son las denominadas laminaciones, como se observa en la Figura 3.1.

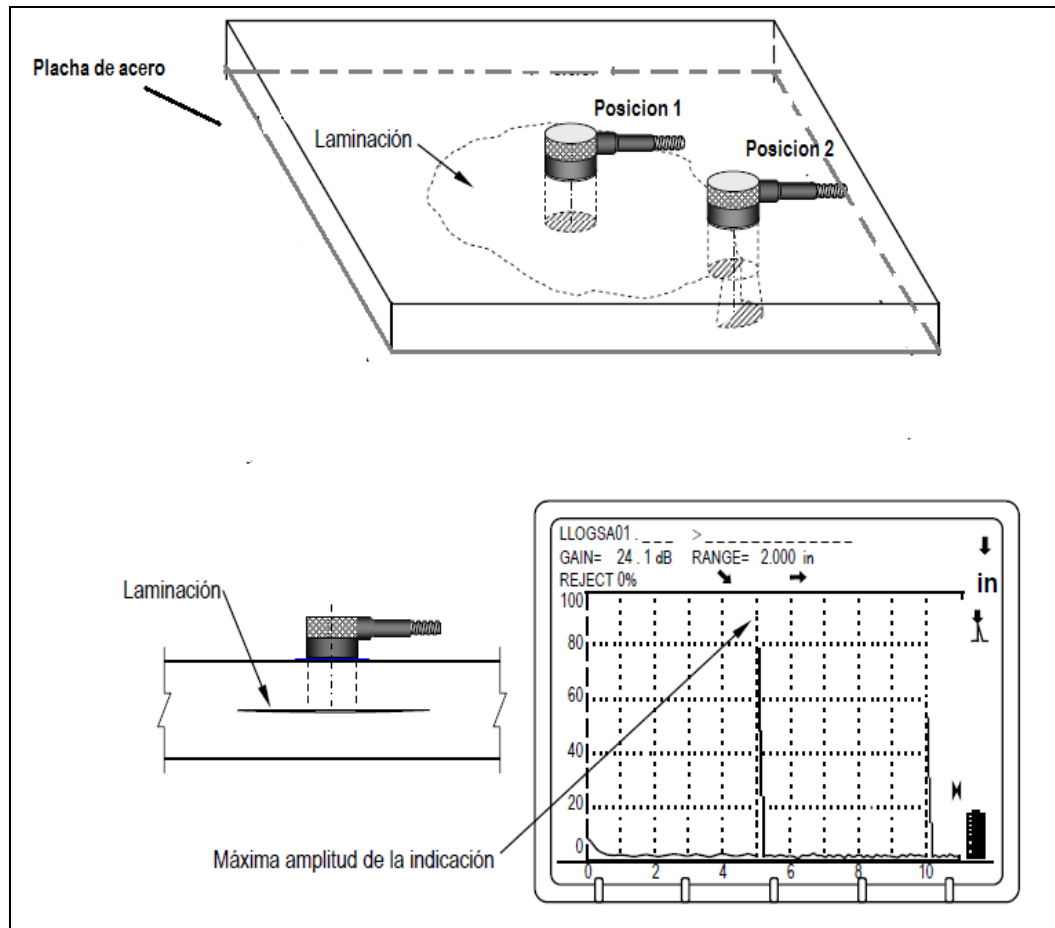


Figura 3.1: Ensayo de ultrasonido con haz normal para descarte de laminación.

3.2 Inspección de juntas soldadas a tope

Obviamente, las inspecciones de juntas soldadas con transductor de haz recto son raramente posibles. Aún en la inspección de juntas en las que se ha maquinado el refuerzo de cara, es de poca utilidad, particularmente, para la detección de grietas o discontinuidades cerca de la superficie. Puede aplicarse, por ejemplo, en juntas de bridas a tubería o conexiones, con el transductor colocado en el borde de la pieza, pero, en espesores delgados de pared, puede esperarse interferencia producida por las paredes, debido a la generación de ondas transversales y la reducción de la sensibilidad para discontinuidades cercanas a una de las dos superficies. Para juntas soldadas de placas, piezas planas o tubería, se considera utilizar principalmente ondas de corte, siendo utilizadas las reflexiones entre las dos superficies de la placa. En algunos casos, un haz ancho podría cubrir una junta en una pasada del transductor; sin embargo, en otros casos es necesario desplazar el transductor en ángulos rectos a la junta para que sea cubierta sucesivamente la sección transversal completa.

Supongamos que se va a inspeccionar un cordón de soldadura mediante ultrasonido, por medio de un transductor angular. De la Figura 3.2, para poder barrer toda la sección transversal del cordón, será necesario desplazar el transductor 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 transductor, el haz barre paulatinamente la sección transversal del cordón, desde la raíz hasta el refuerzo, momento en el cual el transductor se encontrará a la distancia de un salto.

De lo anterior se deduce que el operador que va a realizar la inspección tiene la certeza de barrer con el haz todo el cordón desplazándolo entre las distancias, SD y $SD/2$. Ahora bien, se explicó anteriormente que cada transductor, cuenta con el factor $2 \operatorname{tg} \theta$, para cada ángulo de entrada, de forma que, con solo conocer el espesor de la placa, pueden

determinarse las mencionadas distancias. La distancia de salto y de medio salto, varía considerablemente en función de los ángulos de entrada.

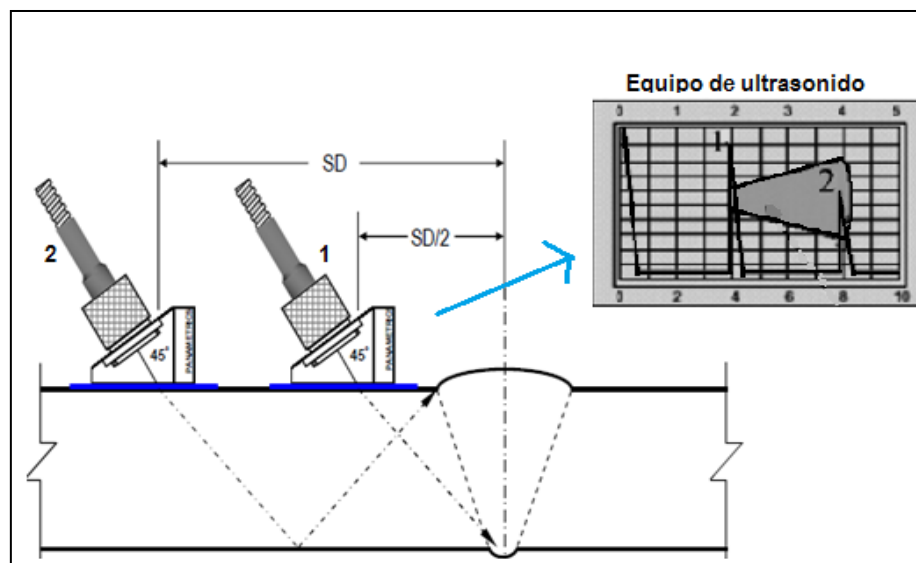


Figura 3.2: Inspección de una unión a tope con transductor de haz angular.

En un principio, parece lógico pensar que con objeto de evitar desplazamientos considerables del transductor sobre la superficie de la placa, y, por consiguiente, facilitar la tarea del operador, deberían elegirse siempre ángulos de entrada pequeños, puesto que entonces los desplazamientos del transductor serían menores. Sin embargo, para poder realizar la inspección de la soldadura no es factible emplear siempre transductores con ángulo pequeño. Ocurre que, como el punto de salida del haz se encuentra aproximadamente en el centro del transductor, muchas veces resulta imposible realizar la inspección cuando la distancia de medio salto es muy pequeña, pues el transductor tropieza con el refuerzo del cordón. Por el contrario, si para una placa de un espesor grueso se elige un ángulo de entrada grande, supongamos de 80 grados, las distancias de salto y de medio salto serían considerables, así que, habría que desplazar el transductor a mayores distancias hacia adelante y hacia atrás para poder barrer toda la sección transversal del cordón, lo que resultaría bastante molesto para el operador. Además,

ocurre que el ultrasonido ha de recorrer trayectos muy grandes hasta llegar al cordón, lo cual produce atenuación, consiguientemente considerable, debido a lo cual, para poder detectar posibles discontinuidades en el cordón, deberíamos amplificar al máximo o bien aumentar la potencia de emisión, lo que trae consigo una pérdida en el poder de resolución. En este estado de cosas, parece lógico pensar que se deben emplear transductores con ángulo de entrada elevado para espesores medios y finos, y ángulos de entrada bajos para soldaduras de grandes espesores. En este informe utilizando las Tablas 2.5 y 2.6 podremos saber los ángulos de los transductores a utilizar en la inspección dependiendo del espesor de la plancha base.

Al realizar la inspección de una soldadura por ultrasonido, y con el fin de efectuar un barrido eficiente y confiable, es recomendable establecer un área sobre la superficie del metal base, a todo lo largo de la soldadura, desde la línea central de la soldadura y hasta la distancia de medio salto y de un salto. A esta región se le denomina “Zona de Barrido”, como se ilustra en la Figura 3.3. Esta “Zona de Barrido”, es el espacio dentro del cual se deberían realizar los desplazamientos y movimientos del transductor.

El borde de la zona de barrido, que corresponde a la distancia de salto, y al cual se recomienda agregar una pulgada, se le conoce como “Límite Lejano”, y el borde que corresponde a la distancia de medio salto se le denomina “Límite Cercano”. Puede esperarse que la inspección esté sujeta a disturbios provocados por la presencia de laminaciones e inclusiones en el metal base, las cuales podrían evitar que el haz se propague como se desea y que, además, resulte en indicaciones que puedan parecer y confundirse con discontinuidades en la junta. Por esta razón, antes de iniciar la inspección de la soldadura, debería efectuarse una verificación de la calidad del material base dentro de la zona de barrido, con haz recto. También, se debe tener muy en cuenta la forma del cordón ya que puede afectar la inspección de la soldadura, esto por la presencia de indicaciones producidas por reflexiones desde extremos proyectados agudos, tales como el refuerzo excesivo de raíz o de cara, particularmente si el ángulo

del haz es pequeño. Un disturbio similar, puede ser causado por el chisporroteo de soldadura. Se recomienda que la soldadura sea barrida desde ambos lados sobre una sola superficie o, si es posible, desde un lado sobre ambas superficies, para asegurar que sean detectadas discontinuidades planas no orientadas verticalmente.

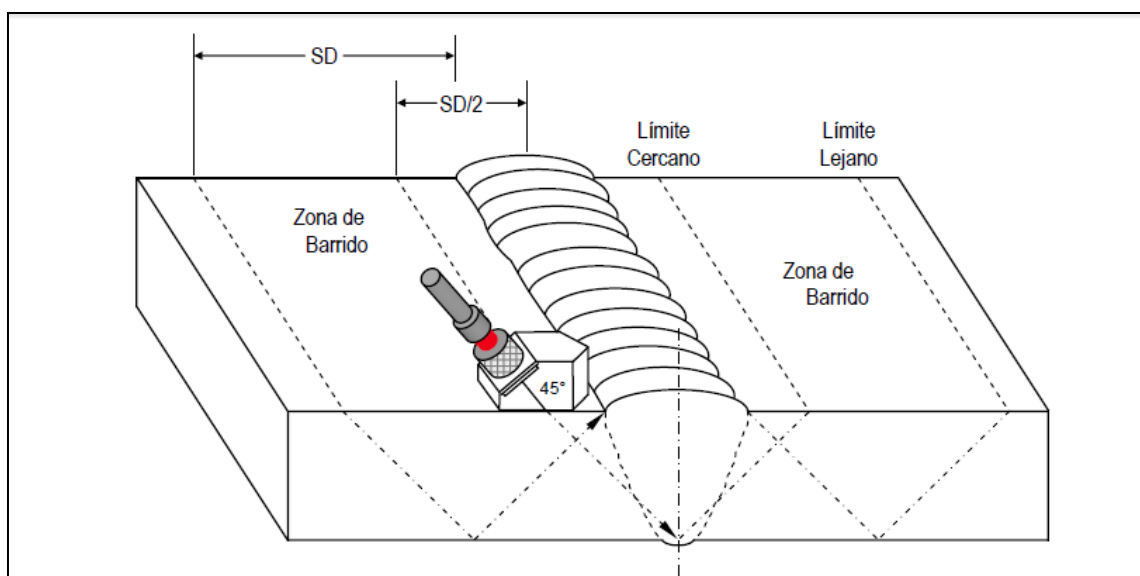


Figura 3.3: Zona de barrido

Hemos dicho que para realizar la inspección de un cordón de soldadura, es necesario desplazar el transductor angular dentro de la zona de barrido. No obstante, cabe preguntarse ¿cómo se ha de realizar este desplazamiento? .En primer lugar, para detectar la presencia de discontinuidades longitudinales en soldaduras en las que el refuerzo ha sido o no ha sido esmerilado a ras, el transductor debe mantenerse perpendicular al eje de la soldadura y movido sobre la zona de barrido como se indica a continuación:

Para cubrir totalmente la sección transversal de la soldadura, incluyendo la zona afectada por el calor, se debe realizar el desplazamiento del transductor dentro de la zona de barrido, hacia delante y hacia atrás, desde el límite cercano hasta el límite lejano o viceversa. Es necesario realizar un movimiento lateral, paralelo al eje de la soldadura, a

todo lo largo de la junta. El avance del transductor no debe exceder del 75% de su ancho activo por cada barrido o, de acuerdo con algunos requisitos específicos de códigos o normas, el traslape mínimo entre cada desplazamiento del transductor debe ser del 10% al 15% de su dimensión transversal. Se debe tener en cuenta que algunas discontinuidades no son completamente paralelas al eje de la soldadura, por lo que, cada desplazamiento transversal y longitudinal debe realizarse en combinación con un movimiento radial del transductor, oscilando entre 10° y 15° a cada lado de la línea central del transductor. Debemos considerar que algunas discontinuidades pueden tener una orientación tal que sean buenos reflectores sólo desde un lado del cordón, así que, podría ser necesario realizar la inspección desde ambos lados del cordón siempre que ello sea posible.

Siempre se debe tener presente que todos estos movimientos deben ser adecuadamente combinados, para tener la mayor seguridad en la detección de discontinuidades de cualquier orientación. Al combinar estos movimientos, el patrón de barrido puede ser en zig-zag con cambios agudos de dirección o con cambios cuadrados, como muestra en la Figura 3.4.

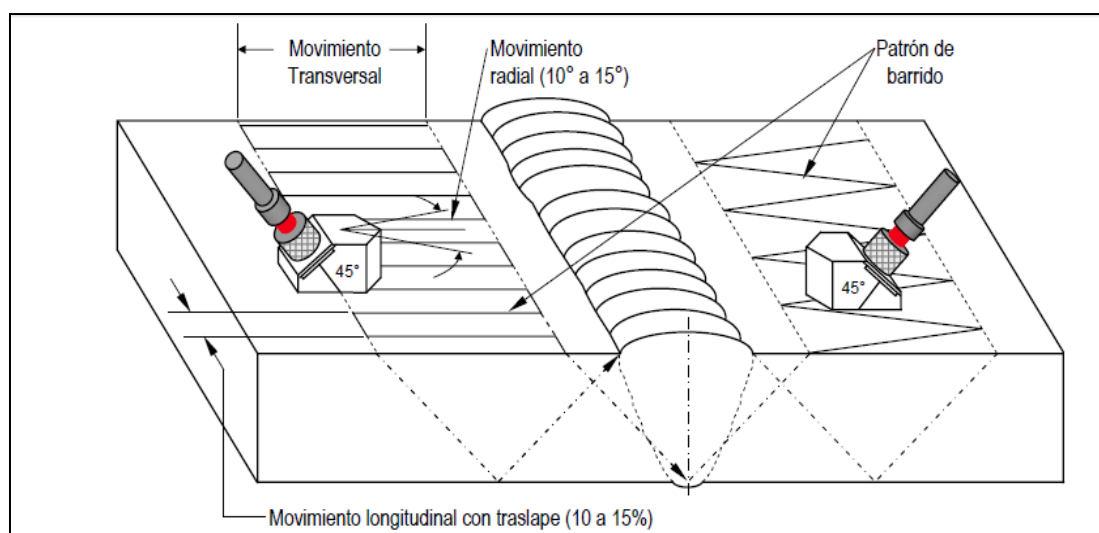


Figura 3.4: Patrones de barrido.

Una discontinuidad dada en un objeto inspeccionado representa un obstáculo al ultrasonido, con lo que, la información sobre esta discontinuidad es obtenida por el ultrasonido reflejado por ella, esto es por su eco. Normalmente, la evaluación de una discontinuidad se basa precisamente en esa reflexión producida. Las discontinuidades naturales pueden ser muy irregulares y de forma compleja, lo cual, normalmente no permite realizar una evaluación simple. La evaluación de una discontinuidad demanda habilidad y experiencia del operador, además, que el equipo funcione en condiciones óptimas; todo esto debido, principalmente, a los problemas que pueden estar involucrados. Aunque en general, el equipo, la sensibilidad y las técnicas utilizadas en la inspección de soldaduras requieren que se mantenga la atención de un operador experimentado.

Existe una serie de factores que afectan la evaluación de una discontinuidad como son: la exactitud en la calibración, 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, la experiencia del operador.

Con el fin de realizar la evaluación de una discontinuidad, dependiendo del criterio de aceptación y rechazo que aplique a la soldadura y producto inspeccionado, podría ser necesario determinar, con la mayor exactitud, todas o casi todas sus características. A continuación, se describe como pueden llevarse a cabo estas determinaciones:

Cuando se ha completado la calibración en distancia del instrumento, se puede obtener la lectura real de la distancia recorrida por el ultrasonido hasta donde se encuentra localizada la discontinuidad y, con esto, determinar su localización aproximada, gracias a que puede calcularse su profundidad; o, con el método de calibración de la posición, se puede conocer directamente la profundidad a la que se encuentra la discontinuidad.

La amplitud de la señal de una discontinuidad puede ser usada como una medición de su tamaño y severidad. La evaluación de la amplitud debería basarse en la experiencia que se tenga con discontinuidades reales, esto debido a que los reflectores producidos artificialmente no siempre están relacionados directamente con las formas y tamaños de discontinuidades reales. Para discontinuidades planares orientadas adversamente, la amplitud puede no indicar la severidad de la discontinuidad.

Ahora, tomando como base sus dimensiones perpendiculares al haz ultrasónico, 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, en la posición donde está localizada la discontinuidad).

El código AWS D1.1, para estructuras soldadas de acero, requiere que las indicaciones o ecos de barrenos laterales y/o ranuras, sean usados para establecer niveles de referencia, con los cuales se determina la severidad de las discontinuidades.

Además de evaluar la localización y el tamaño de reflectores, hay varios otros atributos que pueden ser usados para identificar el tipo de reflector. Aunque en este caso, puede hacerse énfasis en que esto depende de la habilidad del operador, a tal grado, que no se recomienda la aceptación de soldaduras basándose únicamente en este tipo de información. La naturaleza de una discontinuidad presente en una soldadura puede determinarse, con cierta exactitud, basándose en la experiencia del operador, al observar el comportamiento de las indicaciones sobre la pantalla del instrumento, cuando el transductor es manipulado y de acuerdo ha como es interceptado el haz ultrasónico por la discontinuidad.

Existe una fuerte distinción entre criterios de aceptación radiográfica de porosidad, inclusiones, discontinuidades de fusión y grietas, con respecto a los criterios de

aceptación ultrasónica. Afortunadamente, para trabajos de inspección ultrasónica de materiales en servicio, las grietas son más fácilmente detectadas e identificadas que la porosidad e inclusiones. Además, las grietas son discontinuidades que inician en condiciones de servicio y la porosidad, inclusiones, fusión incompleta, etc., se producen durante la fabricación. La orientación del reflector puede ser deducida de las amplitudes relativas de la señal obtenidas desde el reflector, con el transductor colocado en varias posiciones sobre la soldadura. La forma del reflector y la rugosidad resultan en un grado característico de definición en la deflexión del trazo de la pantalla, dependiendo de la naturaleza de la discontinuidad, y la combinación del instrumento y el transductor utilizados. Parte de la información sobre la forma de la discontinuidad está dada por la forma de la indicación y, también, por los cambios que sufre la indicación si se cambia la dirección en la que incide el haz ultrasónico.

Un poro aislado puede ser rápidamente y fácilmente identificado, la Figura.3.5, muestra un barrido orbital, el cual, ayuda a identificar la presencia de un reflector simétrico.

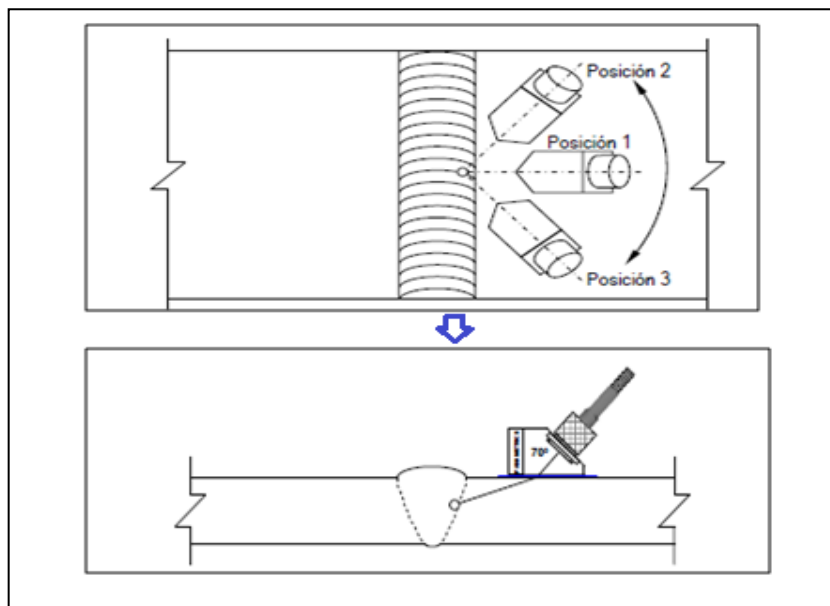


Figura 3.5: Modo de barrido para la identificación de porosidad.

Se produce un eco angosto y bien definido, (Figura 3.6), que puede ser detectado desde cualquier dirección. La indicación aparece a la misma distancia recorrida por el haz ultrasónico y muestra casi la misma amplitud sin importar la dirección.

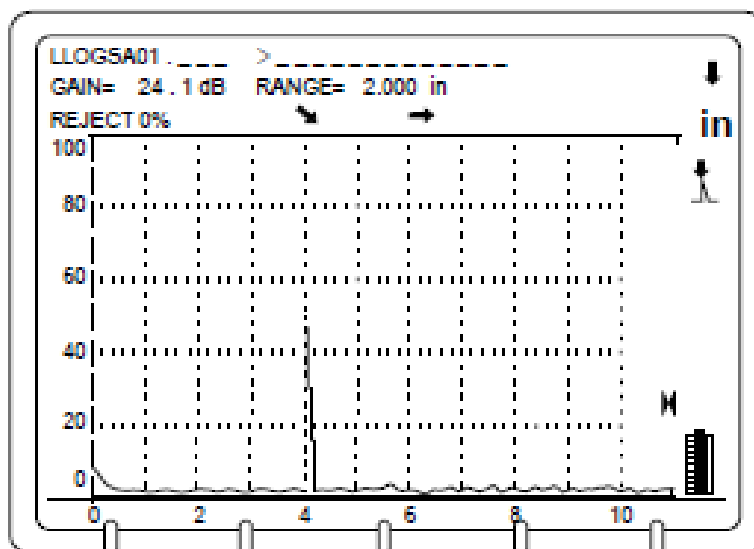


Figura 3.6: Representación de la porosidad en la pantalla del equipo.

La identificación de un grupo o cadena de poros es totalmente diferente, las indicaciones individuales de los poros pueden ser integradas en una sola indicación en la pantalla y son difíciles de distinguir de indicaciones de inclusiones y grietas.

La inclusión de escoria, puede ser identificada, observando el comportamiento de la indicación, ya que es posible ver el extremo de la misma, como se observa en la Figura 3.7. Las inclusiones de escoria, producen indicaciones de mayor amplitud que las producidas por porosidad, ya que cuentan con una superficie reflectora mayor (Ver Figura 3.8). Una indicación de inclusión rara vez se comporta como la producida por un poro o una grieta de fabricación, pero frecuentemente es difícil de distinguir de una cadena alargada de poros.

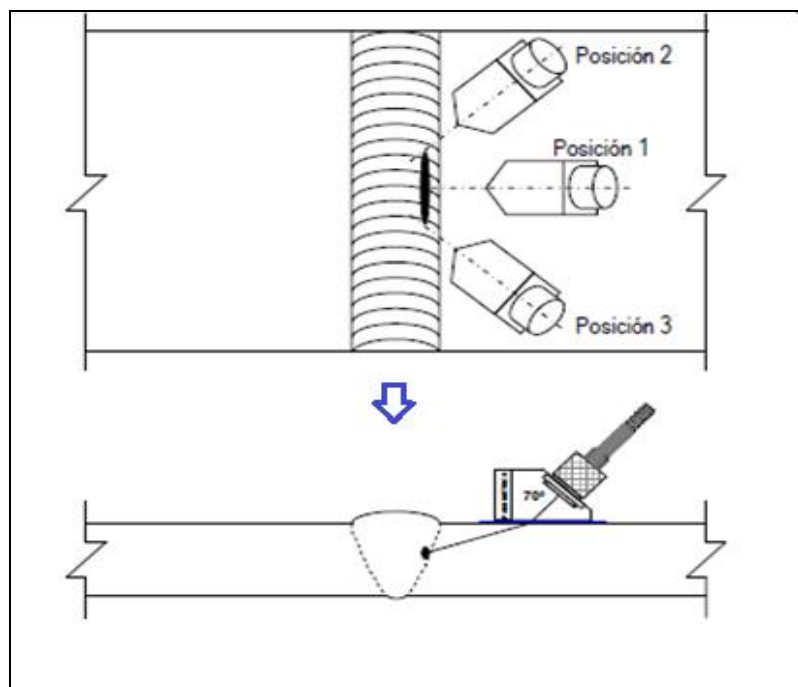


Figura 3.7: Detección e identificación de escoria

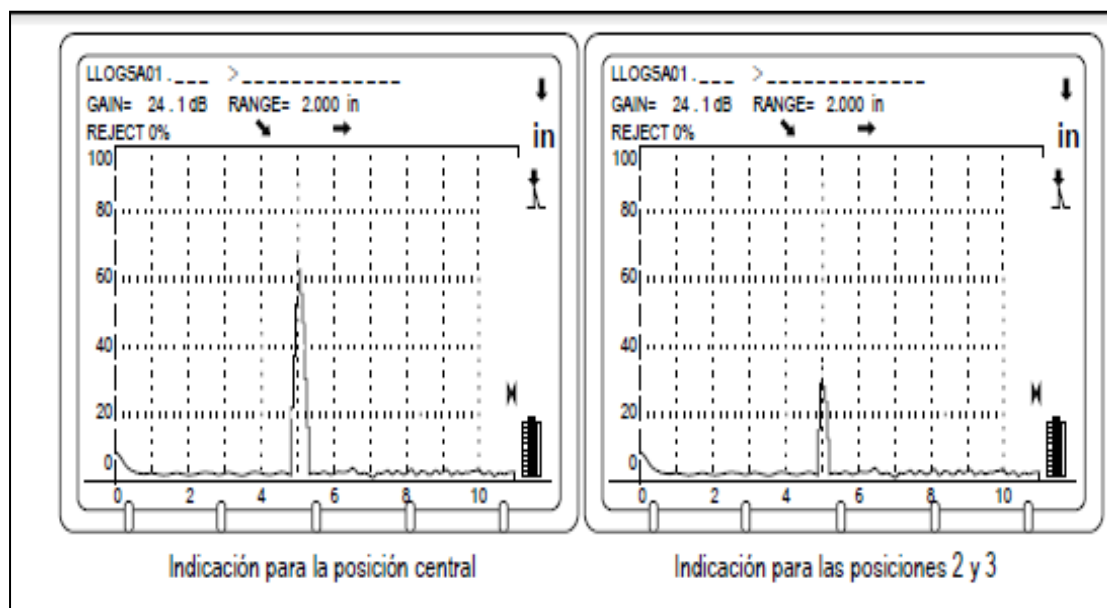


Figura 3.8: Representación de la escoria en la pantalla del equipo.

La Identificación de grietas de fabricación, es distintivamente diferente de las grietas por fatiga, tanto por su localización como por su apariencia ultrasónica. Normalmente, pero no siempre, se localiza a la mitad del espesor de la soldadura. Su superficie se describe como dentada o múltiple, por lo que, su indicación puede confundirse con una cadena de poros o de inclusiones puntuales cercanas y conectadas. Dependiendo de su orientación y otros factores, una grieta de este tipo puede mostrar indicaciones de alta o de baja amplitud. Sin embargo, las grietas de fabricación tienen dos características que ayudan a su identificación: tienen una dimensión a través del espesor y; la indicación de una grieta de fabricación consiste de un grupo de varias indicaciones traslapadas, cada una con una ligera diferencia en la distancia recorrida por el haz ultrasónico dentro del material, las cuales forman un patrón ancho, cuya amplitud depende de la orientación de la grieta. Esta indicación es distintivamente diferente de las obtenidas de porosidad o inclusiones. Con el movimiento orbital resulta una caída rápida de la amplitud del eco, comparado con la porosidad o inclusiones. La Figura 3.9, ilustra la detección de grietas de fabricación.

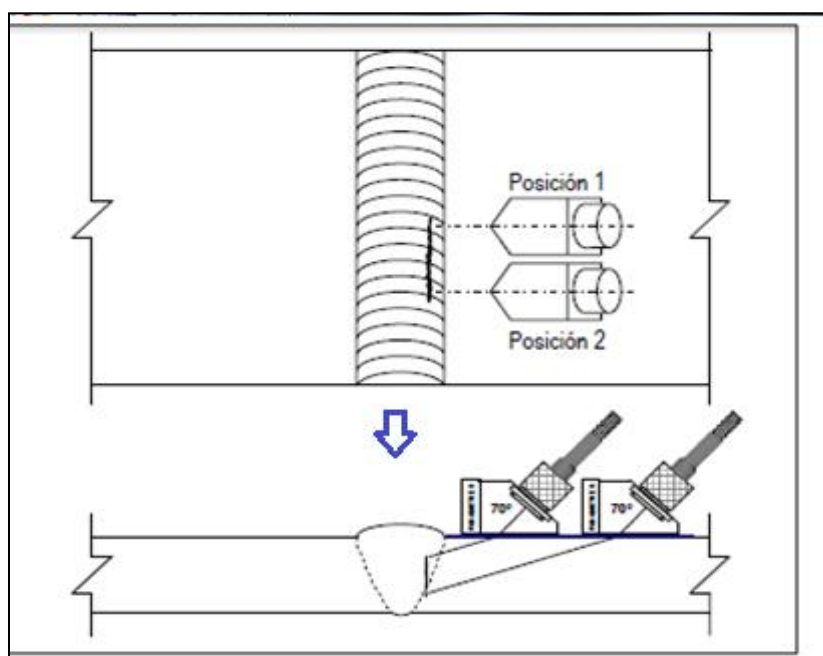


Figura 3.9: Detección e identificación de grietas de fabricación.

La Figura 3.10, muestra la indicación en la pantalla del instrumento ultrasónico, producida por una grieta de fabricación.

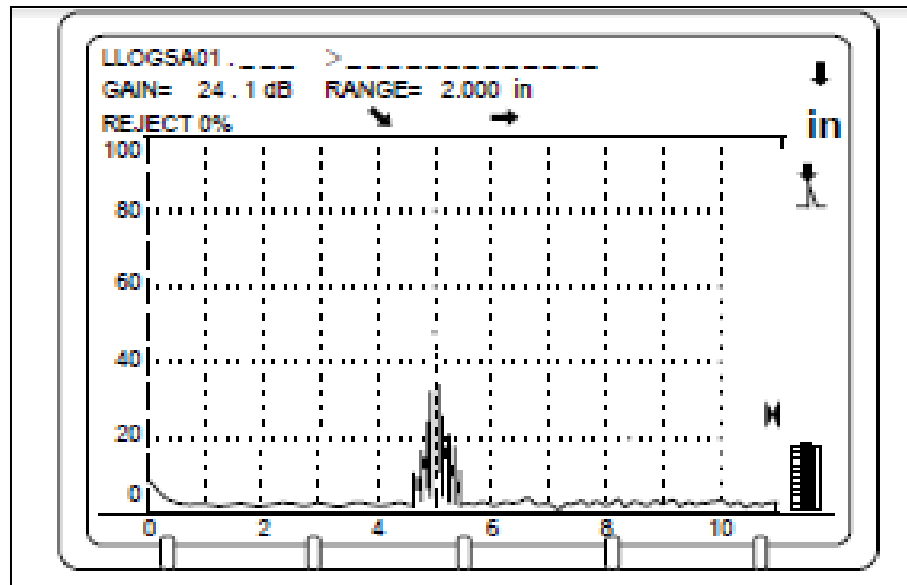


Figura 3.10: Representación de grieta de fabricación, en la pantalla del equipo.

3.3 Aplicación del ensayo de ultrasonido, utilizando el equipo USM Go.

Antes de inspeccionar un cordón de soldadura por ultrasonido, primero lo que debemos preguntarnos es, en base a que código va a ser inspeccionado, ya que dependiendo de ello, la calibración del equipo se hará en base a patrones de calibración especificados en dicho código, y además al momento de evaluar si la soldadura es aceptada o rechazada, también nos basaremos en los criterios de aceptación – rechazo, que estipula dicho código. Para nuestro caso, se trata de cordones de soldadura a tope, que van a soportar cargas estáticas, las cuales serán inspeccionados, basándonos en el código AWS D1.1.

Cuando se realiza la inspección y se encuentra una discontinuidad, el aparato de ultrasonido, nos da valores como son: profundidad, desplazamiento horizontal, desplazamiento angular, “a”, “c”, “d” y “b”, que fue hallado en el momento de la calibración. De todos los valores mencionados anteriormente, es el valor de “d” el que nos dará la base para aceptar o rechazar una soldadura, añadiendo también a ello la longitud de la discontinuidad si el código lo estipula.

Es importante mencionar primero algunos puntos importantes previos al desarrollo de la práctica. El USM Go, es un detector de fallas, fabricado cumpliendo con los requisitos que establece el código AWS D1.1, es del tipo pulso-eco y tiene un ancho de banda de 0.2 a 20 MHz, cuenta con barrido “A-Scan” ,con trazo de señal rectificadas. Otras características ergonómicas diseñadas para la inspección de estructuras es su tamaño (175 x 111 x 50 mm) y peso (845 g), que permiten que el equipo sea llevado por andamios y escaleras sin ningún problema. La pantalla se configura en colores y es de alto contraste, lo que permite una mejor visibilidad en condiciones no ideales de inspección, cuenta además con una memoria, para un fácil manejo de la información. El transductor que se utiliza es de 2.25 MHz y el bloque de calibración del IIW. Ver Figuras 3.11 y 3.12.



Figura 3.11: Equipo USM Go, Patrón IIW, cable coaxial, transductor y acoplante.

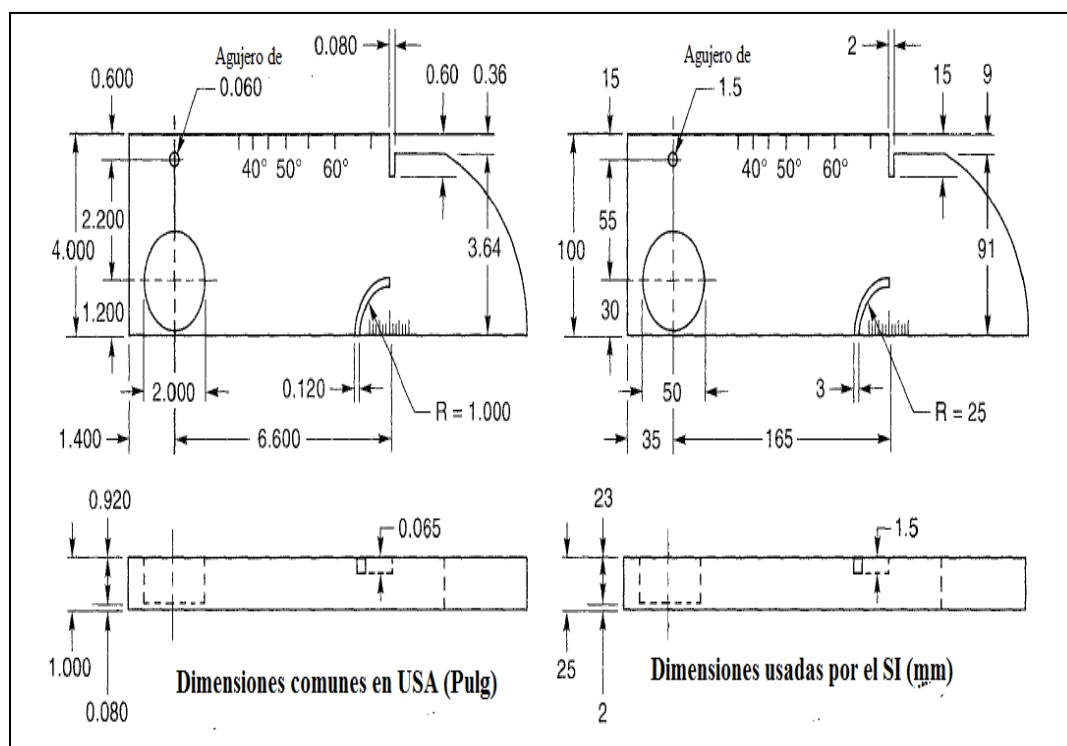


Figura 3.12: Dimensiones del patrón de calibración del IIW.

Como primer paso, se debe de encender el equipo y conectar el cable al transductor (previamente montado sobre la zapata con un poco de acoplante) y posteriormente el otro extremo del cable en la conexión del transmisor del equipo. Ahora es necesario verificar y realizar los ajustes previos a la calibración en el equipo, como son: se debe ajustar la ganancia entre 40 ó 50 dB; se debe seleccionar un rango de 10"; se debe ajustar el retardo del palpador (P-DELAY) en "0.000"; se debe de ajustar la velocidad del material a 0.1280" μ /s ; se debe de ajustar el retardo de pantalla (D-DELAY) en "0.000" ; se debe de ajustar el voltaje "HIGH"; se debe de Ajustar el amortiguamiento en "50 Ω ". Se debe de ajustar el PRF "AUTO HIGH"; se debe de Ajustar la frecuencia en "BROADBAND"; se debe de ajustar la rectificación en "FULLWAVE"; se debe de ajustar el modo Dual en "Off"; se debe de ajustar el rechazo en "0 %" ; se debe de ajustar el ángulo a "70°"; se debe de Ajustar el espesor a 4" ; se debe de ajustar las lecturas SA, DA, PA ; se debe de ajustar el GATE Start en 0.500" ; se debe de ajustar GATE Width en 9.500" ; se debe de ajustar el Gate Threshold en 20 % ; se debe de ajustar el punto de medición a "PICO". Algunos de estos ajustes se muestran en la Figuras 3.13.

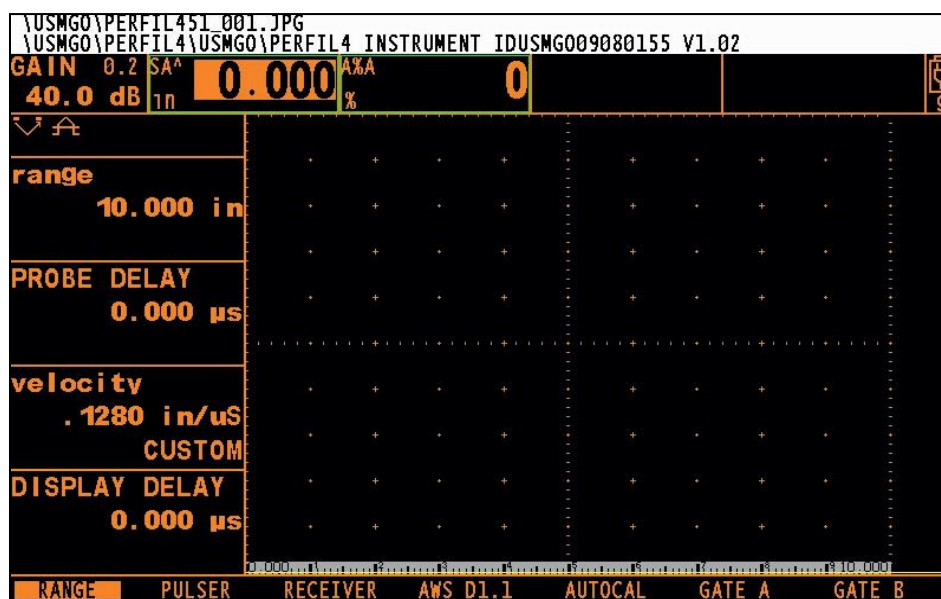


Figura 3.13: Ajustes del equipo USM Go, antes de la calibración.

Para determinar el punto de salida del haz ultrasónico, se aplica un poco de acoplante sobre la superficie del bloque haciendo coincidir la línea inclinada que está en el costado de la zapata con el centro del radio de 4", dirigido a la superficie curva (ver Figura 3.14). Se debe de ajustar la ganancia para que la indicación proveniente de la superficie curva del bloque alcance una amplitud aproximada del 50 % de la escala vertical de pantalla, sin considerar su posición a través de la escala horizontal de la pantalla. Ahora se debe de mover el transductor hacia atrás y hacia delante hasta que se obtenga la máxima amplitud de la indicación en la pantalla. Una vez que tenemos la máxima amplitud, sin mover el transductor, se debe de observar si la marca en la zapata del punto de salida del haz coincide con la marca del centro de la curvatura del radio de 4", grabada en el bloque. Si la marca no coincide, debe colocarse un pedazo de cinta sobre el costado de la zapata y marcar sobre la cinta el punto donde coincide con el centro de la curvatura del bloque.

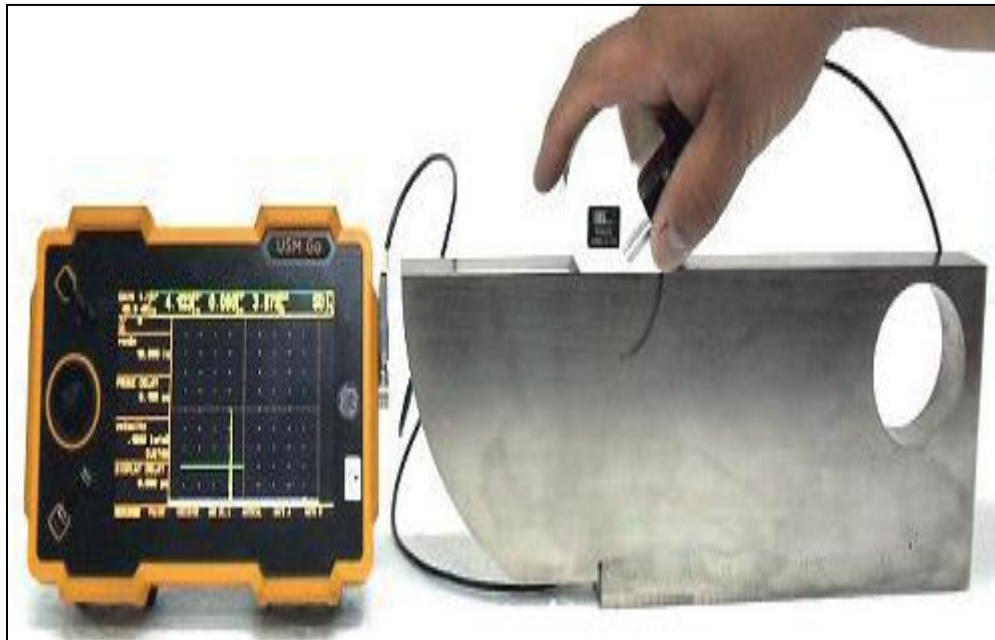


Figura 3.14: Determinación del punto de salida del haz ultrasónico.

Para la verificación del ángulo de refracción, se utiliza, las escalas grabadas y graduadas en el costado del patrón del IIW. Se debe colocar el transductor sobre la superficie del patrón, de manera que coincida el punto de salida del haz, hallado y marcada en la zapata, con la línea grabada con el ángulo que se esté utilizando, y el transductor debe estar dirigido a él barreno de 2" (ver Figura 3.15). La ganancia debe ajustarse para que la indicación proveniente del barreno de 2", tenga una amplitud del 50 % de la escala vertical. Una vez ajustada la ganancia, se debe de mover el transductor hacia atrás y hacia delante hasta obtener la máxima amplitud de la indicación en la pantalla del USM Go. Ya encontrada la máxima amplitud de la indicación, y sin mover el transductor se debe de observar el valor en grados sobre la escala del bloque, que se localiza en el lugar donde coincide el punto de salida del haz, previamente encontrado. Sí el ángulo encontrado no coincide con el marcado en la zapata, debe registrarse este nuevo valor en el equipo de ultrasonido; El nuevo valor deberá encontrarse dentro de una tolerancia de $\pm 2^\circ$, con respecto al que está grabado en la zapata.

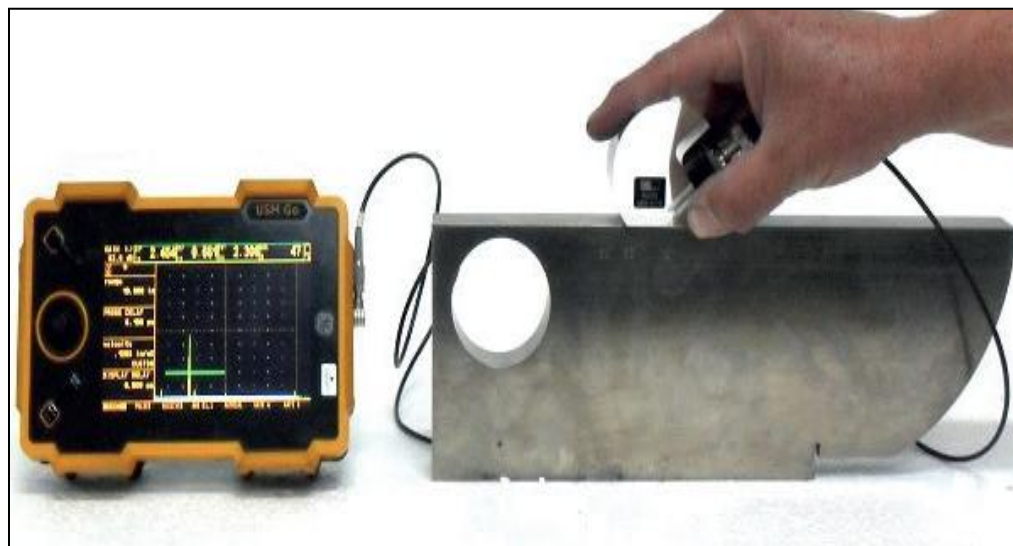


Figura 3.15: Determinación del ángulo de refracción del transductor.

Para la Calibración en distancia se debe colocar un poco de acoplante sobre el bloque y colocar el transductor dirigido a la superficie curva, haciendo coincidir el punto de salida del haz con el centro del radio de 4", como se muestra en la Figura 3.16.

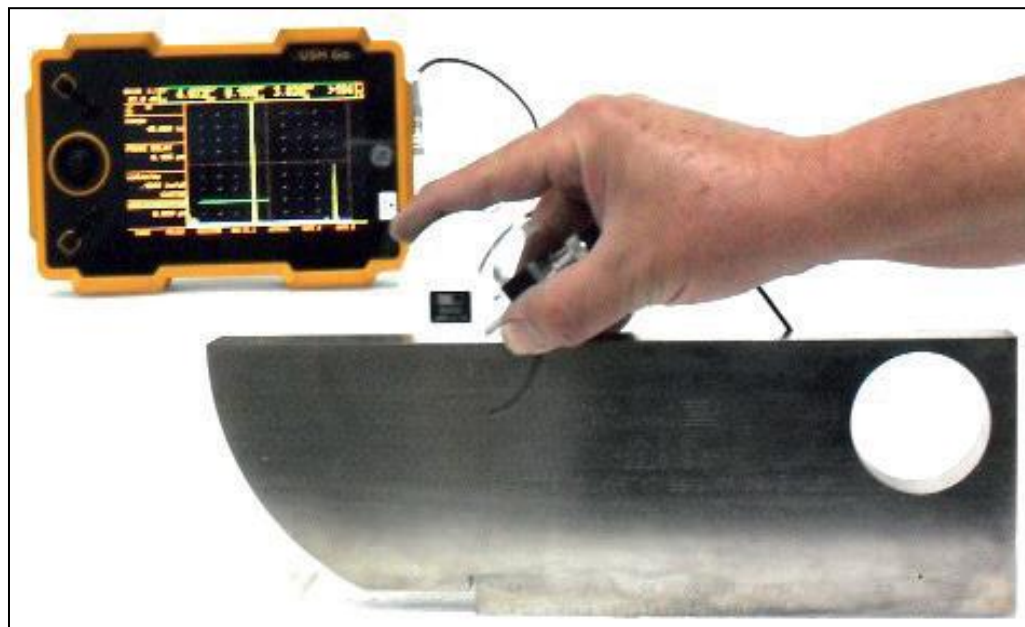


Figura 3.16: Calibración en distancia.

La ganancia debe ser ajustada para que la indicación proveniente de la ranura con curvatura de 1" de radio (normalmente es la tercera indicación después del disparo principal ó pulso inicial) alcance una amplitud del 50% de la escala vertical de la pantalla (Es decir que el pico de la indicación llegue al 50%).

En el menú de AUTOCAL, se ajustan los valores de las dos referencias conocidas (4" y 9"), y se selecciona la función RECORD, dos veces (la primera para prender la función "Record" y la segunda para "Grabar" la primer referencia), en este momento la función de "gate a start" se selecciona para indicar que hay que mover la compuerta para que toque solo la segunda indicación. Ya con la compuerta en la segunda indicación se

selecciona nuevamente dos veces la función RECORD y con esto se finaliza la calibración en distancia.

Observe en la Figura 3.17, que el valor en la línea de medición de SA corresponde a 9” y la función de RECORD está en “OFF”. Por último, mueva la compuerta para que toque la primera indicación y verifique que el valor en la línea de medición de SA, corresponde a 4”.



Figura 3.17: Pantalla del equipo en la calibración en distancia.

El ajuste de sensibilidad se refiere a la ganancia requerida en decibeles, para que la amplitud o altura de la indicación del reflector de referencia alcance un cierto porcentaje sobre la escala vertical de la pantalla. Para el procedimiento de calibración de amplitud ó sensibilidad de acuerdo a AWS D 1.1, se debe colocar el transductor de acuerdo a la posición como se observa en la Figura 3.18 y debe moverse de atrás para adelante para lograr maximizar la indicación proveniente del barreno de 0.060”. Una vez que ya ha sido maximizada la indicación, y sin mover el transductor, debe ajustarse la ganancia

para que la amplitud alcance una línea de referencia horizontal. Ésta máxima lectura obtenida en decibeles (75 dB), debe ser usada como lectura del nivel de referencia (b), en la hoja de reporte de inspección.



Figura 3.18: Ajuste de la sensibilidad.

Una vez que terminamos la calibración del equipo está listo para realizar la inspección, detección y evaluación de las discontinuidades.

El USM Go, cuenta con un software que nos permite encontrar el valor de “d”, que representa la diferencia algebraica en decibeles entre el nivel de la indicación y el nivel de referencia, con una corrección para la atenuación, como se indica en la ecuación (2.1)

Ya por último, antes de iniciar la inspección y detección de fallas, es necesario ajustar el espesor del material que vamos a inspeccionar, en el equipo, para esta práctica se utiliza una placa de 0.750”. En la pieza que se inspecciona, debe de trazarse el área de barrido para garantizar que con el desplazamiento del transductor en ella, el haz ultrasónico está cubriendo el total de la junta de soldadura, la fórmula para calcular el área de barrido se

muestra en la ecuación (1.23). Después de realizado un barrido sobre la superficie de la pieza (Figura 3.19) y cuando se ha detectado una discontinuidad, se debe de mover el transductor manteniendo la indicación en la pantalla hasta encontrar su máxima amplitud .La compuerta debe estar tocando la indicación proveniente de la discontinuidad, para calcular el valor de “a” en dB, necesario para que esa indicación alcance el nivel de referencia establecido “b”. El factor de atenuación “c”, es también calculado por el software del equipo. Ya con los tres valores (a, b y c), el software, calcula y muestra en el equipo el valor de $d = -1$. Ver Figura 3.20.



Figura 3.19: Aplicación del ensayo de ultrasonido con el equipo USM Go.

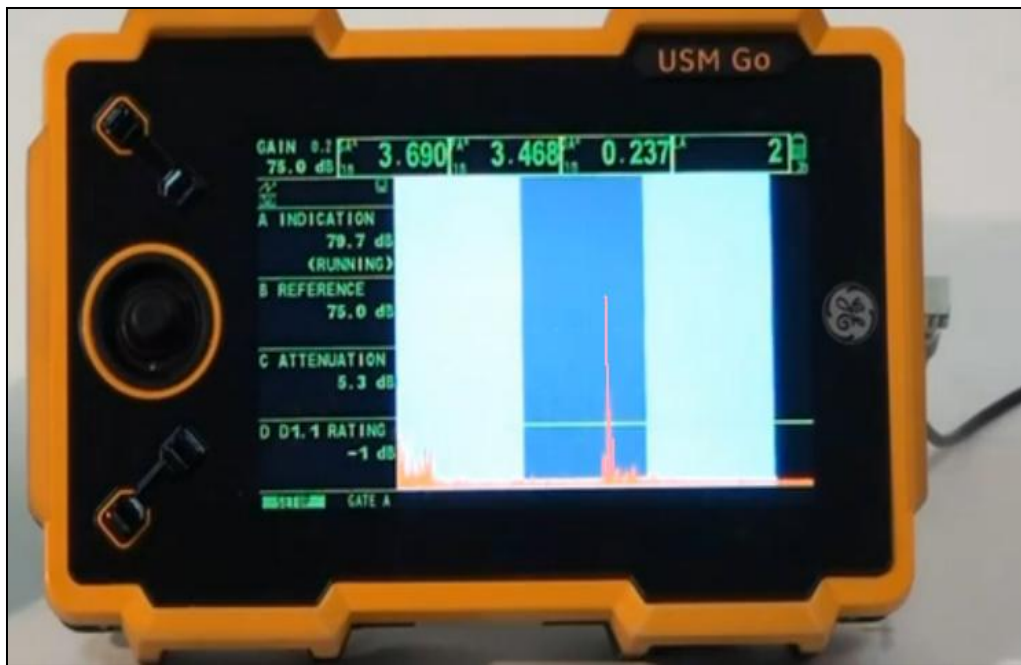


Figura 3.20: Datos registrados en el equipo al captar una discontinuidad.

Para encontrar la severidad de la discontinuidad, se debe ahora encontrar la columna en la Tabla 2.7 (cargas estáticas), que tenga un rango, en el que esté dentro el espesor del material que se inspecciona (0.750") y el ángulo que se utiliza (70°). Una vez, localizada la columna, se busca ahí el valor encontrado de $d = -1$, indicándonos en la tabla que la discontinuidad pertenece a la clase A, por lo que se concluye que la discontinuidad encontrada es un defecto, sin importar su longitud.

Después de la evaluación de la discontinuidad, de acuerdo al código AWS D1.1, en el momento de la inspección, el inspector debe llenar un reporte de campo, en la cual identifique claramente el trabajo y el área de inspección, dichos datos apuntados en el reporte de campo, servirán para elaborar el informe de inspección.

CONCLUSIONES

1. Los resultados al aplicar el ensayo de ultrasonido, mediante la técnica de pulso – eco, utilizando el equipo USM Go, son inmediatos, de buena precisión y de poco riesgo.
2. La interpretación de los resultados obtenidos con el equipo de ultrasonido USM Go, dependen mucho del operador, por lo que dicho operador debe estar certificado como Nivel II de acuerdo con los requisitos de la ASNT.
3. La técnica de pulso – eco, que se detalla en el procedimiento de este informe, es uno de los más utilizados, más económicos y básicos en la inspección por ultrasonido, por lo que también es conocido como ultrasonido convencional.
4. En los últimos años, el progreso en la instrumentación y la tecnología electrónica han hecho que la técnica ultrasónica se haya desarrollado y hecho más versátil, gracias a equipos más sofisticados como el USM Go, con lo cual el operador puede realizar con mayor rapidez y facilidad la calibración del equipo, así como también la inspección de estructuras metálicas.

BIBLIOGRAFIA

1. **American Welding Society**, Structural Welding Code –Steel, 22nd Edition, USA, 2010, Pág. 219-279.
2. **Germán Hernández Riesco**, Manual del soldador, 23^a- edición, Edit. Cesol, Madrid, 2012., Pág. 565-589.
3. **León & Russo Ingenieros S.A.C**, Curso nivel I y II en ultrasonido, 2005.
4. **Ricardo Echevarría**, Ultrasonido .Universidad Nacional de Comahue. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Ensayos no Destructivos, 2002.
5. **Ricardo Echevarría**, Defectología. Universidad Nacional de Comahue. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Ensayos no Destructivos, 2002.
([http://www.sistendca.com/DOCUMENTOS/Defectologia\[1\].pdf](http://www.sistendca.com/DOCUMENTOS/Defectologia[1].pdf)).
6. **Carlos Enrique Suárez Navas**, Inspección de soldaduras empleando el ensayo de ultrasonido en lugar de radiografía, 10 de Marzo de 2011.
(<http://portal.tc.com.co/tecnicontrol/images/publicaciones/articulos/EmpleodeUTenlugardeRT.pdf>).

ANEXOS



NONDESTRUCTIVE TESTING

14359 Miramar Parkway PMB 299 ■ Miramar, Florida 33027
(305) 246-4442 ■ Fax (305) 246-4644 ■ ndtec@attglobal.net

Date: August 30, 2011

Be it known that in Accordance with the documentation provided to this agency,
and the examination scores below

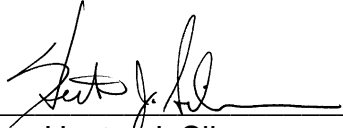
Franz Zevallos Bustamante

Has met the established written and published requirements of ASNT SNT-TC-1A
for Level II certification in

Ultrasonic

<u>EXAMINATION</u>	<u>SCORE</u>	<u>ADMINISTERED BY</u>	<u>DATE</u>
<u>GENERAL</u>	<u>87.5</u>	<u>Hector J. Silverman</u>	<u>08-30-11</u>
<u>SPECIFIC</u>	<u>86.0</u>	<u>Hector J. Silverman</u>	<u>08-30-11</u>
<u>PRACTICAL</u>	<u>95.0</u>	<u>Hector J. Silverman</u>	<u>08-30-11</u>
<u>COMPOSITE SCORE</u>	<u>89.5</u>		

Certification Expiration Date: 08-30-16

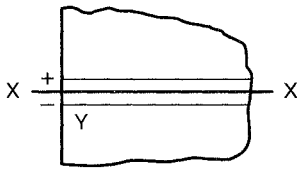


 Hector J. Silverman
 ASNT NDT Level III 17319

245511804
 Certificate Number

Report of UT of Welds

Project _____ Report no. _____



Weld identification _____
 Material thickness _____
 Weld joint AWS _____
 Welding process _____
 Quality requirements—section no. _____
 Remarks _____

Line number	Indication number	Transducer angle	From Face	Leg ^a	Decibels				Discontinuity				Discontinuity evaluation	Remarks	
					Indication level	Reference level	Attenuation factor	Indication rating	Length	Angular distance (sound path)	Depth from "A" surface	Distance			
												a			b
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															
21															
22															
23															
24															
25															
26															

We, the undersigned, certify that the statements in this record are correct and that the welds were prepared and tested in conformance with the requirements of Clause 6, Part F of AWS D1.1/D1.1M, (_____) *Structural Welding Code—Steel*.
 (year)

Test date _____

Manufacturer or Contractor _____

Inspected by _____

Authorized by _____

Note: This form is applicable to Clause 2, Parts B or C (Statically and Cyclically Loaded Nontubular Structures). Do **NOT** use this form for Tubular Structures (Clause 2, Part D).

Date _____