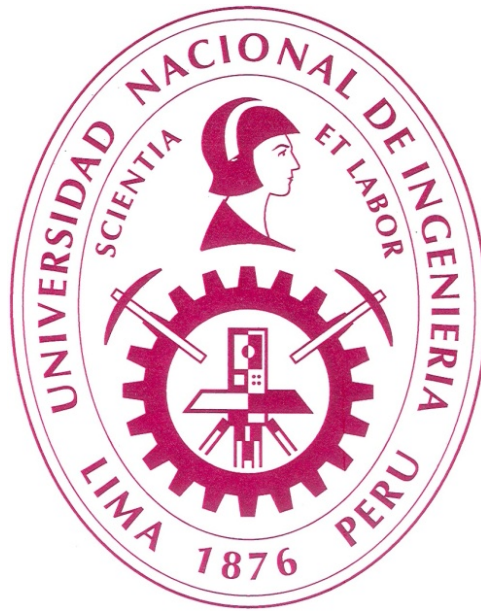


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA



**ENSAYO DE ULTRASONIDO APLICADO EN LA DETERMINACION
DE LA CALIDAD DE UNIONES SOLDADAS SEGÚN EL CODIGO
AWS D1.1 EN EL PROYECTO EXPANSION ANTAMINA**

INFORME DE COMPETENCIA PROFESIONAL

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

**PRESENTADO POR:
SALAZAR REYES, Angel Hugo**

LIMA – PERÚ

2012

DEDICATORIA

A mis padres, abuelitos, hermanos y demás familiares por su infinito apoyo a lo largo de todas mis metas emprendidas, y a mi novia Rocío Álvarez Flores por su constante empuje para la elaboración de este informe.

AGRADECIMIENTO

Primeramente agradezco a Dios por darme la inmensa alegría de tener una vida llena de salud y felicidad, a mi alma mater, la UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA que me formó académica y profesionalmente, al ingeniero Jaime Giraldo G., al señor Juan Ipince T. y a todas aquellas personas que día a día me brindaron su apoyo incondicional.

RESUMEN

Se presenta detalladamente la aplicación del método de ensayo no destructivo, el ultrasonido, en la determinación de la calidad de las uniones soldadas como parte de la normativa de calidad en la construcción de estructuras metálicas. La técnica desarrollada es la de pulso-eco, basado en los requerimientos de inspección del código AWS D1.1 – 2008 para estructuras no tubulares con carga estática. La aplicación de este método se realizó en la fabricación de vigas prefabricadas de espesores comprendidos entre 8 y 75 mm (en alas y alma) del proyecto Expansión Antamina.

La elección del método de ensayo por ultrasonido fue por la rapidez en la obtención de los resultados de las inspecciones a las uniones soldadas y por ser un método que no presenta ningún peligro para personal operativo y público en general. Los excelentes resultados obtenidos son consecuencia de la correcta calibración del equipo, la adecuada aplicación del método e interpretación de las reflexiones obtenidas en la pantalla del equipo. Además dan resultados altamente eficaces y confiables.

ÍNDICE

INTRODUCCION	(1)
---------------------------	-----

CAPITULO I: FUNDAMENTO TEORICO

1. Principios básicos de ultrasonido.....	(4)
1.1 Reseña histórica.....	(4)
1.2 Concepto.....	(6)
1.3 Movimiento ondulatorio.....	(8)
1.4 Tren de ondas.....	(8)
1.4.1 Periodo.....	(9)
1.4.2 Frecuencia.....	(9)
1.4.3 Longitud de onda.....	(10)
1.5 Tipos de onda.....	(10)
1.5.1 Ondas longitudinales.....	(10)
1.5.2 Ondas transversales.....	(11)
1.5.3 Ondas superficiales.....	(12)
1.6 Reflexión.....	(13)
1.7 Refracción.....	(16)
1.8 Cambio de modos.....	(17)
1.9 El efecto piezoeléctrico.....	(18)
1.10 Haz ultrasónico.....	(21)
1.10.1 Zona muerta.....	(21)
1.10.2 Campo cercano.....	(22)
1.10.3 Campo lejano.....	(23)
1.10.4 Divergencia del haz ultrasónico.....	(24)
1.10.5 Amplitud-distancia.....	(25)
1.11 Transductores.....	(26)
1.11.1 El elemento activo.....	(26)

1.11.2	Respaldo.....	(26)
1.11.3	Placa de desgaste.....	(27)
1.12	Técnicas de ensayo.....	(28)
1.12.1	Técnica de reflexión o pulso-eco.....	(29)
1.12.2	Técnica de transmisión.....	(29)
1.12.3	Técnica de resonancia.....	(30)
1.13	Métodos de barrido.....	(31)
1.13.1	Barrido tipo A.....	(31)
1.13.2	Barrido tipo B.....	(33)
1.13.3	Barrido tipo C.....	(34)

CAPITULO II: REQUERIMIENTOS GENERALES

2.1	Calificación de inspectores.....	(36)
2.2	Aplicación del ensayo de ultrasonido.....	(36)
2.3	Condiciones requeridas de la superficie y métodos de preparación.....	(37)
2.4	Acoplante.....	(37)
2.5	Equipo de ultrasonido.....	(38)
2.6	Transductores.....	(39)

CAPITULO III: PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

3.1	Calibración del equipo de ultrasonido.....	(40)
3.1.1	Posición del control de rechazo.....	(40)
3.1.2	Técnica.....	(40)
3.1.3	Recalibración.....	(41)
3.1.4	Calibración con haz normal.....	(41)
3.1.5	Calibración con haz angular.....	(42)
3.1.6	Distancia de acercamiento de la unidad de búsqueda.....	(45)
3.2	Técnica operacional del ensayo.....	(47)
3.2.1	Línea X.....	(47)

3.2.2	Línea Y.....	(47)
3.2.3	Extensión del ensayo.....	(48)
3.2.4	Tamaño del reflector.....	(48)
3.2.5	Inaccesibilidad.....	(49)
3.2.6	Ensayo de soldaduras.....	(50)
3.2.7	Escaneo.....	(51)
3.2.8	Juntas a tope.....	(52)
3.2.9	Nivel de indicación.....	(53)
3.2.10	Factor de atenuación.....	(54)
3.2.11	Clasificación de la indicaciones.....	(54)
3.2.12	Longitud de las discontinuidades.....	(55)
3.2.13	Bases para la aceptación o rechazo.....	(55)
3.2.14	Identificación del área rechazada.....	(56)
3.2.15	Reparación.....	(56)
3.2.16	Reportes de reexamen.....	(56)

CAPITULO IV: APLICACIÓN DEL METODO DE ULTRASONIDO

4.1	Habilitado de planchas.....	(57)
4.2	Ensayo de ultrasonido.....	(58)
4.2.1	Documentación.....	(58)
4.2.2	Calificación del personal.....	(58)
4.2.3	Calificación del equipo de ultrasonido.....	(58)
4.2.3.1	Procedimiento de calificación del equipo.....	(59)
4.3	Calibración con haz angular.....	(62)
4.4	Aplicación del método.....	(62)
4.5	Interpretación de resultados.....	(63)

CONCLUSIONES.....	(68)
--------------------------	-------------

BIBLIOGRAFIA.....	(70)
--------------------------	-------------

ANEXOS.....	(71)
--------------------	-------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Equipo de la tecnología Krautkrämer	(5)
Figura 1.2 Espectro acústico mostrando los rangos del sonido	(6)
Figura 1.3 Principio de oscilación en cuerpos metálicos elásticos	(7)
Figura 1.4 Dirección de oscilación y propagación de las ondas longitudinales	(11)
Figura 1.5 Dirección de oscilación y propagación de las ondas transversales	(12)
Figura 1.6 Dirección de oscilación y propagación de las ondas superficiales	(13)
Figura 1.7 Esquema de la refracción de un haz ultrasónico	(16)
Figura 1.8 Conversión de una onda longitudinal a cuatro ondas	(18)
Figura 1.9 Rango útil para transductores de haz angular para aceros ...	(19)
Figura 1.10 Efecto piezoeléctrico directo	(20)
Figura 1.11 Efecto piezoeléctrico inverso	(20)
Figura 1.12 Ejes cristalográficos del cristal de cuarzo	(21)
Figura 1.13 Partes del haz ultrasónico	(24)
Figura 1.14 Curva de respuesta de amplitud de un transductor típico ...	(25)
Figura 1.15 Partes de un transductor	(27)
Figura 1.16 Partes específicas de un transductor	(28)
Figura 1.17 Palpadores normales	(28)
Figura 1.18 Palpador angular	(28)
Figura 1.19 Técnica de pulso - eco	(30)
Figura 1.20 Técnica de transmisión	(30)
Figura 1.21 Barrido tipo A (A-Scan)	(33)
Figura 1.22 Barrido tipo B (B-Scan)	(34)
Figura 1.23 Barrido tipo C (C-Scan)	(35)
Figura 3.1 Posiciones del transductor para realizar la calibración del equipo	(46)

Figura 3.2 Distancia mínima de acercamiento de la unidad de búsqueda	(46)
Figura 3.3 Ubicación de la Línea "X" y las Caras de Barrido en Distintos Tipos de Juntas(48)
Figura 3.4 Vista de Planta de Patrones de Exploración para UT(53)
Figura 4.1 Se muestra una vista de perfil y de planta del método de inspección realizada por ultrasonido de una unión soldada(64)
Figura 4.2 Se muestra la presencia de una indicación en la pantalla del equipo(66)
Figura 4.3 Se muestra la ausencia de indicaciones en la pantalla del equipo(66)
Figura 4.4 Marcaje del resultado final después de la inspección de una unión soldada(67)

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Lista de valores de impedancias, velocidad y densidad de algunos materiales	(15)
Tabla 2.1 Equipos de ultrasonido de la propiedad de NDT	(38)
Tabla 2.2 Transductores de propiedad de la empresa NDT	(39)
Tabla 3.1 Incremento de Sensibilidad para Componentes No Tubulares Sometidos a Carga Estática	(50)
Tabla 3.2 Incremento de Sensibilidad para Componentes No Tubulares Sometidos a Carga Dinámica	(50)
Tabla 3.3 Selección del procedimiento de escaneo de una unión soldada	(51)
Tabla 3.4 Selección de los ángulos de ensayo según la tabla 3.3	(52)

--.--

INTRODUCCIÓN

Antecedentes:

La compañía Antamina contrata a la empresa Aker Solutions Peru S.A. para realizar la ingeniería del proyecto de ampliación, a su vez esta contrata a la empresa Técnicas Metálicas Ingenieros S.A.C. para la fabricación de las estructuras metálicas equivalente a un tonelaje de 4500.

La empresa Técnicas Metálicas subcontrata a la empresa NDT Engineering S.A.C. para realizar el ensayo de ultrasonido al 100% de las uniones soldadas con penetración total.

NDT Engineering inicia sus operaciones en la planta de Técnicas Metálicas, ubicado en el Km 17.5 antigua panamericana sur – Villa el Salvador, el 22 de marzo del 2010 con la inspección de las planchas con haz normal y el 7 de abril con la inspección de las uniones soldadas con haz angular.

Exposición de Motivos:

El método de ultrasonido se basa en un fenómeno físico adaptado para evaluar la integridad estructural de los materiales de ingeniería. Se utiliza en el control de calidad e inspección de materiales, en diferentes ramas de la industria. Sus principales aplicaciones consisten en¹: Detección y caracterización de discontinuidades, medición de espesores, extensión y grado de corrosión, determinación de características físicas (estructura metalúrgica, tamaño de grano y constantes elásticas), definir características de enlaces (uniones) y evaluar la influencia de las variables de proceso en el material.

Este método ofrece ventajas como gran poder de penetración para medir a través de grandes espesores, gran sensibilidad, lo que permite la detección de discontinuidades extremadamente pequeñas, gran exactitud al determinar la posición, estimar el tamaño, caracterizar orientación y forma de las discontinuidades. Requiere una sola superficie de acceso, la interpretación de los resultados es inmediata, no existe peligro o riesgo en la operación de los equipos, usa equipos que son portátiles, su aplicación no afecta en operaciones posteriores, y los equipos actuales proporcionan la capacidad de almacenar información en memoria, la cual puede ser procesada digitalmente por una computadora para caracterizar la información almacenada.

¹ León & Russo Ingenieros, *Curso de nivel I y II*, 17 (2005)

El método presenta limitaciones como:

Se requiere de personal experimentado con gran conocimiento técnico para el desarrollo de los procedimientos de inspección, la inspección se torna difícil en superficies rugosas o partes de forma irregular, en piezas pequeñas o muy delgadas, las discontinuidades sub superficiales pueden no ser detectadas.

Objetivos del informe:

Aplicar la teoría del ensayo no destructivo – Ultrasonido – en las actividades industriales como son: fabricación, manufactura y mantenimiento. Así mismo, demostrar la correcta calibración del equipo y aplicación del ensayo no destructivo en la determinación de la calidad de las uniones soldadas en estructuras no tubulares con carga estática, de forma rápida, sencilla y precisa; cumpliendo con todos los requerimientos de calidad internacionales.

CAPITULO I

FUNDAMENTO TEORICO

1. Principios básicos del ultrasonido

1.1 Reseña histórica

Sergei Sokolov, científico soviético, propone en 1928, y unos años más tarde demostró una técnica a través de la transmisión para la detección de defectos en los metales. Propuso que la técnica podría ser utilizada para detectar irregularidades en sólidos como los metales².

Sokolov posteriormente describió otro y, obviamente, el concepto más importante en las aplicaciones de ultrasonidos. Él demostró que las ondas de sonido podrían ser utilizados como una nueva forma de microscopio, basándose en un principio de reflexión. Sokolov reconoció que un "microscopio" que utiliza ondas sonoras con una frecuencia de 3.000

² Benson Carlin, *Ultrasonica*, 78 (1972)

megahercios (MHz) podría tener una resolución igual a la del microscopio óptico.

No se encontró un método práctico de inspección hasta que Firestone (E.U.A.) inventó un aparato empleando haces de ondas ultrasónicas pulsadas para obtener reflexiones de defectos pequeños, conocido como “Reflectoscopio Supersónico”, que fue mejorado por el rápido crecimiento de la instrumentación electrónica. En el mismo período en Inglaterra, Sproule desarrolló equipos de inspección ultrasónica en forma independiente.

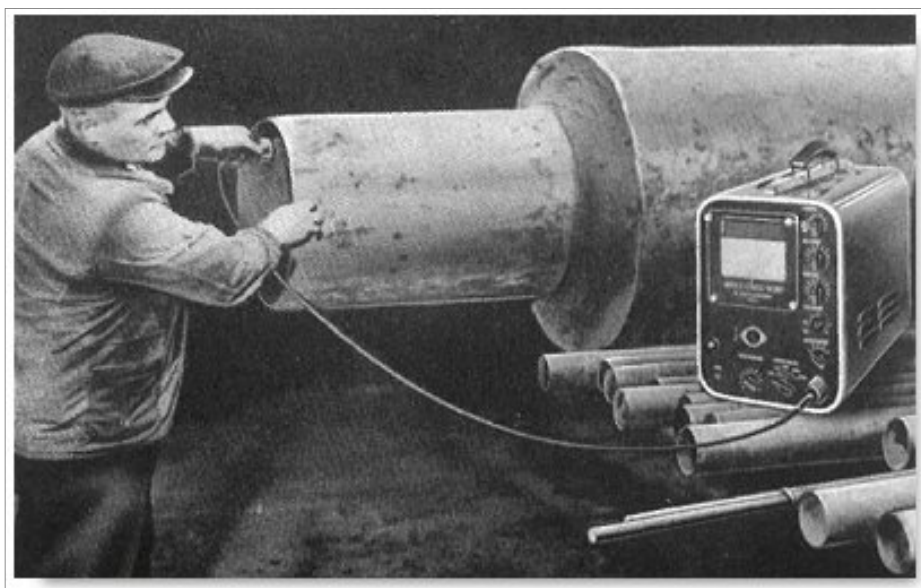


Figura 1.1 Equipo de la tecnología Krautkrämer (década de 1950)

Varios años más tarde, en Alemania en 1949, dos personas recibieron información sobre el Reflectoscopio de Firestone-Sperry por las publicaciones de sus documentos técnicos: Josef Krautkrämer en Colonia y Karl Deutsch en Wuppertal. Ambos comenzaron la evolución - sin el

conocimiento de la otra. En la *figura 1.1* se muestra uno de los primeros equipos de ultrasonido Krautkrämer.

1.2 Concepto

El sonido es la propagación de energía sónica (vibraciones con frecuencias de 16 a 20,000 ciclos/segundo, que pueden ser percibidas por el oído humano) a través de sólidos, líquidos y gases. Las ondas vibratorias de frecuencia superior al límite de audición normal se llaman “*Ultrasonidos*”³ (*Figura 1.2*), y, por ello, la palabra incluye todas las ondas de más de 20 kHz. Sin embargo, el rango de frecuencias empleados normalmente en los ensayos no destructivos de ultrasonido y medición de espesores es de 100 kHz a 50 MHz.

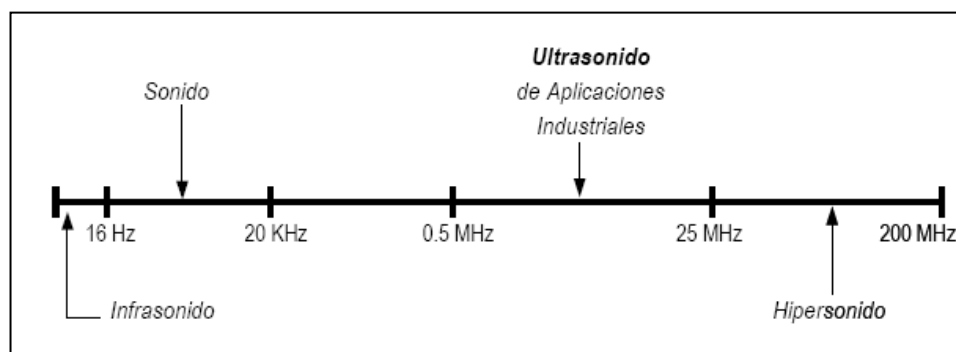


Figura 1.2 Espectro acústico mostrando los rangos del sonido.

Una depresión de una superficie de su posición original es llamada desplazamiento⁴. Las vibraciones pasan a través de un material sólido como

³ Benson Carlín, *Ultrasonica*, 15 (1972)

⁴ NDT Tec. INC, *Ultrasonic Inspection Technology*, 7.

una sucesión de desplazamientos de partículas. Esto puede verse en la *Figura 1.3*.

La estructura de un material es en realidad de muchas pequeñas partículas o grupos de átomos. Estas partículas tienen posiciones normales y de reposo, y pueden ser desplazados de estas posiciones por alguna fuerza. Cuando la fuerza se retira, las partículas tienden a retornar a sus posiciones originales.

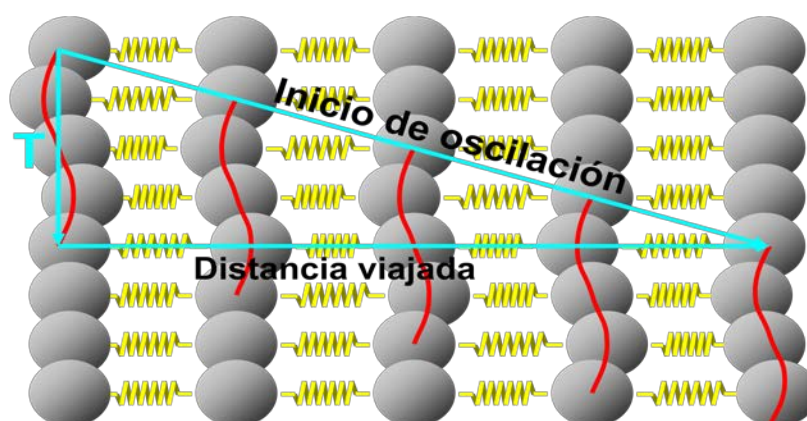


Figura 1.3 Principio de oscilación en cuerpos metálicos elásticos.

La energía se transmite a través de un material sólido por una serie o pequeños desplazamientos de material dentro del material. La transmisión de vibraciones ultrasónicas a través de un material está relacionada con las propiedades elásticas del material.

1.3 Movimiento ondulatorio

El término implica una condición que es transmitida de algún modo, de modo que puede ser experimentada a una cierta distancia de donde originalmente fue generada. Las ondas ultrasónicas son formas especiales de estos tipos generales, en las que la condición que se propaga es un desplazamiento de las partículas del medio en el que la onda viaja⁵.

Casi cualquier material que tenga elasticidad puede propagar ondas ultrasónicas. La propagación toma la forma de un desplazamiento de elementos sucesivos del medio. Si la sustancia es elástica hay una fuerza recuperadora que tiende a devolver cada elemento del material a su posición original. Como todos estos medios tienen también inercia, la partícula continua moviéndose después de volver a la posición que comenzó su movimiento y, finalmente, alcanza otra posición diferente, más allá de la original. Desde este segundo punto vuelve a su posición original, alrededor de la cual continúa oscilando con amplitud constantemente decreciente. Por consiguiente, los elementos del material realizaran diferentes movimientos u orbitas, mientras la onda pasa a través de ellos.

1.4 Tren de ondas

Un tren de ondas representa una sucesión de paquetes de ondas, donde antes o después del mismo no hay ninguna onda. Cada paquete se llama habitualmente impulso y puede ser de formas distintas, en su aspecto, las

⁵ Benson Carlín, *Ultrasónica*, 16 (1972)

ondas individuales de un impulso pueden ser de aproximadamente de la misma amplitud, y pueden detenerse y comenzar muy rápidamente, de modo que su envolvente, es decir, el lugar geométrico de sus puntos extremos, es esencialmente una onda cuadrada.

1.4.1 Periodo (T)

Si se toca una superficie metálica, la superficie se mueve hacia adentro, provocando el desplazamiento⁶. Desde que el metal es elástico la superficie tenderá a volver a su posición original. La superficie también se moverá a través de la posición original y trasladarse a una distancia máxima en la dirección opuesta. Esta secuencia completa de movimientos es definido como un ciclo. El tiempo necesario para que algo se mueva a través de un ciclo completo se llama “*período*” y es medido en segundos.

1.4.2 Frecuencia (*f*)

El número de ciclos en un periodo dado de tiempo es llamado “*frecuencia*”, y su unidad es el hertz (Hz). La relación entre frecuencia y periodo está dada en la *ecuación 1.1*.

$$f = \frac{1}{T} \dots\dots\dots (1.1)$$

⁶ NDT Tec. Inc., *Ultrasonic Inspection Technology*, 8.

1.4.3 Longitud de onda (λ)

Es la relación entre la velocidad (c) con la cual viaja el sonido en el material y la frecuencia, *ecuación 1.2*. Hay que considerar que la velocidad del sonido en un material perfectamente elástico a una temperatura y presión dada es constante.

$$\lambda = \frac{c}{f} \dots\dots\dots (1.2)$$

1.5 Tipos de ondas

Una onda ultrasónica que está siendo transmitida a través de una sustancia puede ser de un tipo cualquiera entre los varios existentes. Cada uno de los tipos ocasiona un movimiento específico de los elementos del medio, y las trayectorias que estos siguen, según se mueven en respuesta a la onda, se llaman su órbita⁷.

1.5.1 Ondas longitudinales

Las ondas longitudinales existen cuando el movimiento de las partículas en un medio es paralelo a la dirección de propagación de la onda como se muestra en la *Figura 1.4*. Estos han sido los más frecuentemente empleados en ultrasonidos, ya que viajan en líquidos, sólidos y gases y se genera y detecta fácilmente.

⁷ Benson Carlín, *Ultrasónica*, 18 (1972)

Las ondas longitudinales tienen una elevada velocidad de desplazamiento en la mayoría de los medios, y las longitudes de onda en los materiales comunes son habitualmente muy pequeñas en comparación con la superficie de corte del transductor, elementos que producen las ondas. Esta propiedad permite que la energía sea enfocada en un haz agudo del que sólo se separa ligeramente.

Figura 1.4 Dirección de oscilación y propagación de las ondas longitudinales

1.5.2 Ondas transversales

Cuando se usan las ondas transversales o de cizalladura, el movimiento de las partículas en el medio es normal a la dirección de propagación de la onda, ver *Figura 1.5*. Estas ondas pueden también existir en un área limitada o completamente en todo un cuerpo. Tienen una velocidad que es aproximadamente la mitad de la de las ondas longitudinales.

Figura 1.5 Dirección de oscilación y propagación de las ondas transversales

Las ondas de cizalladura tienen unas ciertas ventajas, debido a que su más baja velocidad hace que los circuitos electrónicos medidores de tiempo que se usan sean menos críticos. Sin embargo, la más corta longitud de onda hace que sean más sensibles a las pequeñas inclusiones en el medio y, por lo tanto, son más fácilmente dispersadas dentro del material. Estas no viajan en líquidos o gases, ya que hay muy poca o ninguna elasticidad para cizallar en tales medios.

1.5.3 Ondas superficiales (Ondas de Rayleigh)

Las ondas se pueden propagar sobre la superficie de una pieza sin penetrar para nada por debajo de esa superficie. Estas ondas son groseramente análogas a las ondas del agua, que viajan sobre una masa de agua. Su velocidad depende del propio material y es aproximadamente de nueve decimas partes de la velocidad de la onda transversal.

La longitud de onda de una onda superficial es siempre extremadamente corta, y la placa en la que viaja tiene, por lo menos, un espesor de varias longitudes de onda como se muestra en la *Figura 1.6*.

1.6 Reflexión

Cuando una onda que se propaga a través de un material llega a la frontera entre él y un segundo medio, parte de la energía continúa propagándose en forma de onda en el segundo medio, mientras que otra parte es reflejada y vuelve al primer medio, habitualmente con un cambio de fase.

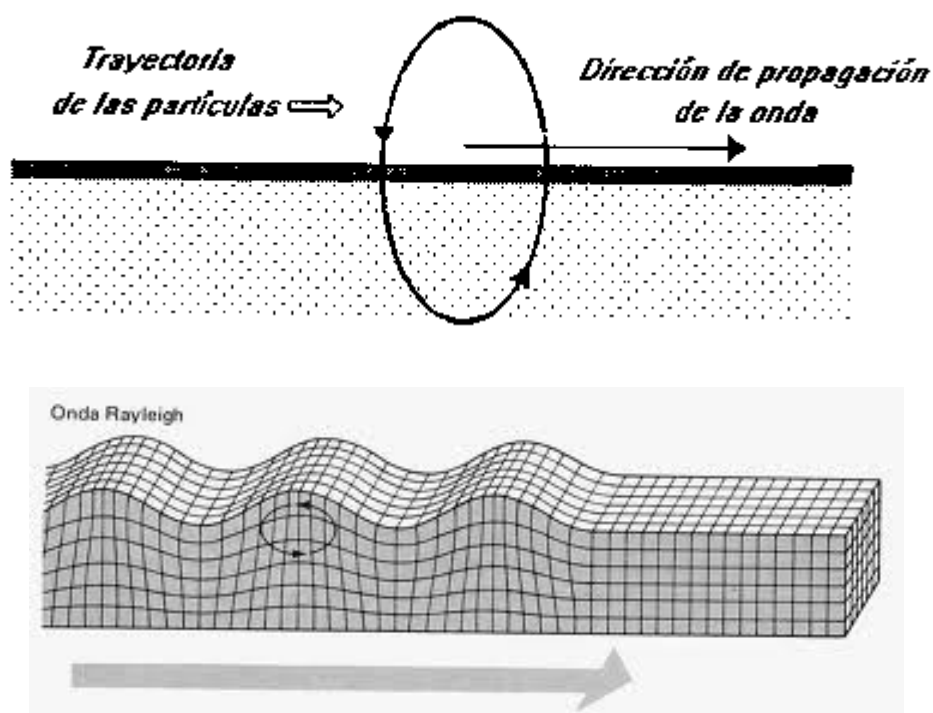


Figura 1.6 Dirección de oscilación y propagación de las ondas superficiales

La característica que determina la cantidad de reflexión se conoce como *impedancia acústica*. Esta es un parámetro que caracteriza la resistencia

que opone el medio a la propagación del ultrasonido y está definido por la *ecuación 1.3*⁸. La mayor parte de las reflexiones en un medio tienen lugar por obstáculos de forma, tamaño y orientación irregulares. Una superficie es plana cuando las irregularidades no son mayores de $1/20\lambda$ aproximadamente.

$$Z = \delta \cdot c \quad \dots\dots\dots (1.3)$$

Donde: Z = impedancia acústica
 δ = densidad del material
 c = velocidad de propagación

Hay dos hechos importantes que influyen en la reflexión. Uno de ellos es la dimensión en la dirección de la trayectoria de propagación; el otro es la sección transversal. La dimensión según la trayectoria de propagación es la que interrumpe la onda, pero la sección transversal es la que determina la cantidad de reflexión.

Si llamamos I a la energía ultrasónica incidente, la parte de energía que es reflejada será igual a I multiplicado por el coeficiente de reflexión R mientras que la energía transmitida al segundo medio será igual a I multiplicado por el coeficiente de transmisión T , obviamente; $R + T = 1$.

⁸ Alfredo Naucevich, *Aplicación de ensayos no destructivos en la industria*, 25 (1996)

Si llamamos Z_1 y Z_2 a las impedancias acústicas del primer y segundo medio, respectivamente, los correspondientes coeficientes de reflexión (ecuación 1.4) y de transmisión (ecuación 1.5) serán:

$$R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \dots\dots\dots (1.4)$$

$$T = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \dots\dots\dots (1.5)$$

De acuerdo con estas formulas podemos ver que la reflexión será máxima cuando sea máxima la diferencia de impedancia entre los dos medios, independientemente de cuál de ellos sea menor.

La *tabla 1.1* muestra los valores de impedancia, velocidad y densidad de algunos materiales de interés⁹.

Tabla 1.1 Lista de valores de impedancias, velocidad y densidad de algunos materiales.

MATERIAL	IMPEDANCIA (Gramos/cm ² -S)	VELOCIDAD (cm/s)	DENSIDAD (gramos/cm ³)
AIRE	0.000033x10 ⁶	0.33x10 ⁵	0.001
AGUA	0.149x10 ⁶	1.49x10 ⁵	1.00
ALUMINO	1.72x10 ⁶	6.35x10 ⁵	2.71
ACERO	4.56x10 ⁶	5.85x10 ⁵	7.8

⁹ NDT Tec. Inc., *Ultrasonic Inspection Technology*, 35.

1.7 Refracción

Es el cambio de dirección que experimenta una onda ultrasónica al pasar de un medio material a otro con diferente velocidad y con un ángulo de incidencia diferente a cero grados con respecto a la normal de la interface¹⁰. Solo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si estos tienen índices de refracción distintos. La refracción se origina en el cambio de velocidad de propagación de la onda.

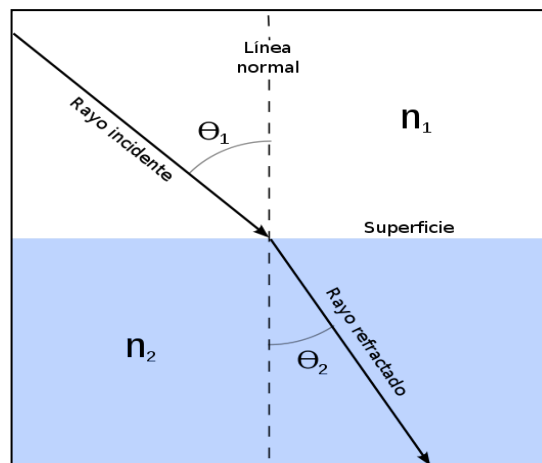


Figura 1.7 Esquema de la refracción de un haz ultrasónico

$$\frac{\text{Sen}\theta_1}{\text{Sen}\theta_2} = \frac{c_1}{c_2} \dots \dots \dots (1.6)$$

El ángulo de esta onda refractada, mostrado en la *Figura 1.7*, está dado por la ecuación 1.6, Ley de Snell:

¹⁰ Centro técnico Indura, Ensayos no destructivos modulo – Ultrasonido en soldaduras,41 (2007)

Donde:

Θ_1 : ángulo de incidencia

Θ_2 : ángulo de refracción

c_1 : velocidad en el medio 1

c_2 : velocidad en el medio 2

1.8 Cambio de modos

La conversión de modos es debida a que la presión acústica de una onda longitudinal incidente, como se dirige oblicuamente al límite, puede descomponerse en dos componentes, una que actúa a lo largo de la superficie límite y otra que actúa perpendicularmente a ella. En el punto de incidencia, por tanto, la superficie límite está sujeta a esfuerzos de compresión y cizalladura pudiendo producirse, tanto la reflexión como la refracción de ondas de compresión y cizalladura.

Por tanto, cuando una onda incide sobre una superficie de separación entre dos materiales bajo ciertos ángulos, pueden aparecer cuatro ondas resultantes (*Figura 1.8*), de las cuales dos se transmiten. En cada caso, una de estas dos es una onda longitudinal, y la otra es una onda transversal.

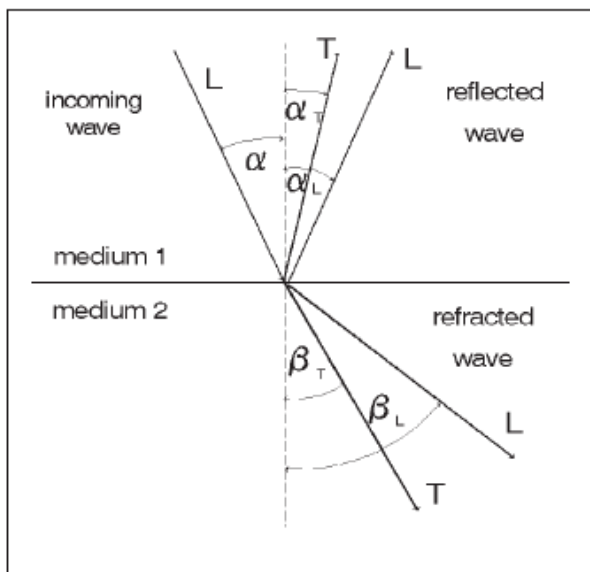


Figura 1.8 Conversión de una onda longitudinal a cuatro ondas

La acción completa es como sigue: cuando una onda longitudinal incidente se le hace girar a partir de la normal se llega a un punto que se conoce como *primer ángulo crítico*, en la cual la onda longitudinal refractada pasa rasando la superficie de separación. Si se continúa girando la onda incidente, se alcanza un segundo punto, que se conoce como *segundo ángulo crítico*, en la cual la onda transversal refractada para rasando la superficie de separación. Esta región formada entre el primer y segundo ángulo crítico es la utilizada para los fines del ensayo de ultrasonido, ver *Figura 1.9*.

1.9 El efecto piezoeléctrico

Ciertos cristales sea naturales o sintetizados tienen la propiedad de que en presencia de un esfuerzo de tracción o compresión se originan cargas eléctricas en su superficie. La carga cambia de signo si se invierte la

dirección del esfuerzo. Así es que en las superficies de un cristal expuesto alternativamente a un esfuerzo de tracción y un esfuerzo de compresión existe un potencial alternativamente positivo y negativo (tensión alterna).

El efecto piezoeléctrico es reversible, es decir, cuando se aplica una carga eléctrica a la superficie del cristal, esta se contrae o se expande según el signo de la carga eléctrica. Una tensión eléctrica alterna, aplicadas a la superficie del cristal, da origen a oscilaciones mecánicas de presión (expansión y contracción); *Figura 1.10*. De la reversibilidad se extrae, de modo inmediato, que puede emplearse el mismo principio para generar y recibir ondas longitudinales ultrasónicas, *Figura 1.11*. En efecto, en la mayoría de los casos se utiliza un mismo cristal como emisor y receptor.

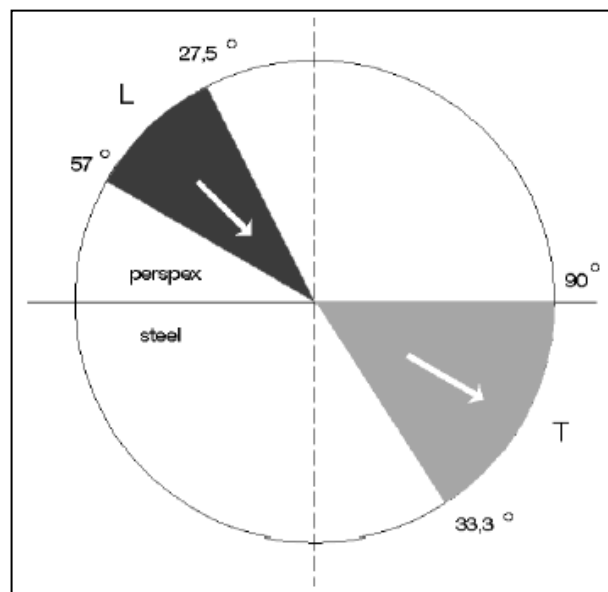


Figura 1.9 Rango útil para transductores de haz angular para aceros

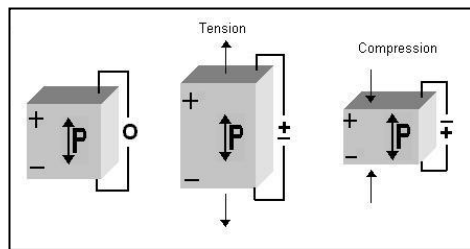


Figura 1.10 Efecto piezoeléctrico directo

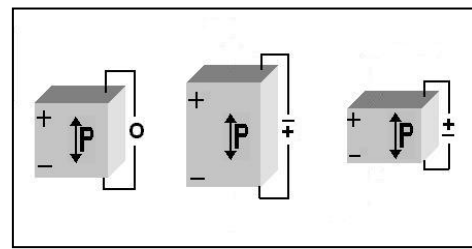


Figura 1.11 Efecto piezoeléctrico inverso

El efecto piezoeléctrico no es propio de todos los cristales y solo se produce en determinadas condiciones. El ejemplo más conocido es el cuarzo. Un cristal de cuarzo natural tiene una forma determinada, siempre recurrente, que se describe con ayuda de los ejes cristalográficos, designados como ejes X, Y y Z, igual que en un sistema de coordenadas cartesianas normales (*Figura 1.12*).

El efecto piezoeléctrico sólo se consigue en el cuarzo si la lámina de cuarzo ha sido cortado del cristal, perpendicularmente al X o al eje Y. en el primer caso, la deformación mecánica del cristal tiene lugar en la misma dirección del campo eléctrico; en el segundo caso perpendicularmente a ella. Los cuarzos de corte X generan ondas longitudinales; los de corte Y, ondas transversales.

Además del cuarzo, la turmalina como mineral natural y los cerámicos sinterizados (titanato de bario, el sulfato de litio, el zirconato de plomo-titanio y el metanobiato de plomo), presentan el efecto piezoeléctrico.

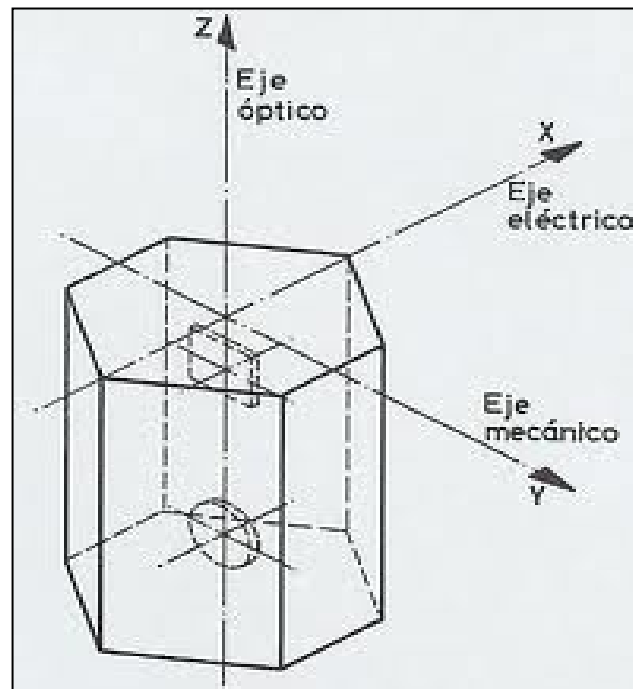


Figura 1.12 Ejes cristalográficos del cristal de cuarzo

1.10 Haz ultrasónico

El haz ultrasónico no se comporta como un pistón, es decir, no tiene una proyección con lados rectos con intensidad uniforme desde la cara del transductor. El haz ultrasónico se esparce conforme se aleja de la cara del transductor y varía en intensidad. El perfil del haz ultrasónico conforme viaja en el material se ha dividido en diferentes zonas por sus características.

1.10.1 Zona muerta

En la inspección por contacto, existe un área frente a la cara del palpador en el que no se puede hacer ningún tipo de inspección. No se puede observar la reflexión desde una discontinuidad porque el pulso inicial en la pantalla es

demasiado grande. Si una discontinuidad estuviera cerca de la superficie, la energía reflejada regresaría al palpador mientras está todavía transmitiendo. La zona muerta o zona de no-inspección es inherente a todos los instrumentos ultrasónicos. En algunos tipos de equipos, la zona muerta no es demasiado obvia. Lo anterior es porque la longitud del pulso inicial puede ser disminuida electrónicamente. La longitud de la zona muerta puede ser estimada y medida en los equipos con presentación de barrido Tipo A. Después de realizar la calibración de distancia, se mide la longitud desde el cero del equipo hasta que la inflexión del pulso inicial regresa a la línea de tiempo base. En el método de inmersión la zona muerta es la longitud del pulso reflejado en la interface entre el agua y el material sujeto a inspección. Para minimizar la longitud de la zona muerta se emplea transductores con alto amortiguamiento que emiten pulsos cortos (banda ancha).

1.10.2 Campo cercano

Extendiéndose desde la cara del palpador existe un área que se caracteriza por las variaciones en la intensidad del haz ultrasónico. Esta área se denomina campo cercano (Zona de Fresnel). Debido a las variaciones en amplitud inherentes, esta zona no es recomendada para la inspección. En esta zona se puede detectar discontinuidades, medir espesores o conocer la profundidad a la que se encuentra una discontinuidad pero no se puede evaluar discontinuidades por comparación contra indicaciones obtenidas de reflectores conocidos a diferentes profundidades y cuando su área es menor que la del transductor. Con diámetros de elementos transductores y

frecuencias más pequeñas se obtiene una longitud de campo cercano más corta. La longitud del campo cercano, como se observa en la *Figura 1.13*, puede calcularse con la ecuación 1.7:

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \dots\dots\dots (1.7)$$

Donde: N = Longitud del campo cercano (pulgadas)

D = Diámetro del elemento transductor (pulgadas)

λ = Longitud de onda (pulgadas)

En el caso de transductores no circulares el valor de "D" será aproximadamente:

D \equiv Lado x 1.125 (para transductores cuadrados)

D \equiv Promedio de los lados x 1.1 (para transductores rectangulares)

1.10.3 Campo lejano

La zona que se encuentra a continuación del campo cercano es llamada campo lejano (ver *Figura 1.13*). En el campo lejano (zona de Fraunhofer) la intensidad del haz ultrasónico decae de manera exponencial conforme la distancia desde la cara del transductor se incrementa.

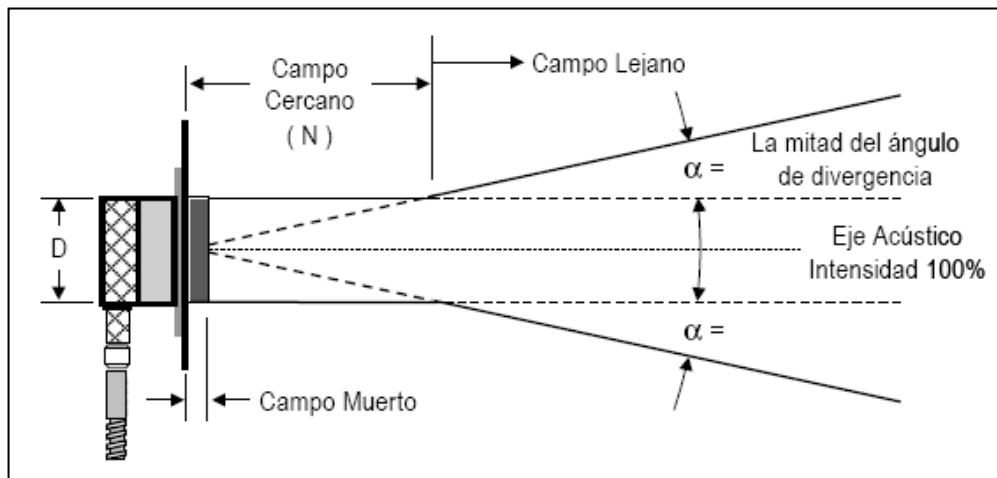


Figura 1.13 Partes del haz ultrasónico

1.10.4 Divergencia del haz ultrasónico

En el campo cercano el haz ultrasónico se propaga en línea recta desde la cara del palpador. En el campo lejano el sonido se esparce hacia fuera como se muestra en la *Figura 1.13*. A una frecuencia dada, entre mayor sea el diámetro del transductor el haz será más recto; con transductores de menor diámetro el haz tendrá una mayor divergencia. De la misma manera, con un mismo diámetro, los transductores de mayor frecuencia, tendrán una menor divergencia. La mitad del ángulo de divergencia (α) está dada por la ecuación 1.8:

$$\text{Sen} \alpha = 1.22 \frac{\lambda}{D} \dots\dots\dots (1.8)$$

Donde: α = La mitad del ángulo de divergencia (grados)

λ = Longitud de onda (pulgadas)

D = Diámetro del transductor (pulgadas)

1.10.5 Amplitud - Distancia

La *Figura 1.14* es un ejemplo de una curva de amplitud contra distancia, debemos notar la curva irregular en el área del campo cercano. Lo importante que debe recordarse es que, cuando se inspecciona dentro del campo cercano, pueden ocurrir grandes variaciones en amplitud de las indicaciones de discontinuidades de un mismo tamaño a diferentes profundidades, siempre será mejor comparar las señales de discontinuidades con las señales de los reflectores de patrones de referencia, como por ejemplo, agujeros de fondo plano que tengan la misma distancia de viaje que la discontinuidad o bien en una zona donde se pueda predecir el tamaño equivalente de la discontinuidad por medio de la amplitud; lo anterior puede realizarse solamente en el campo lejano.

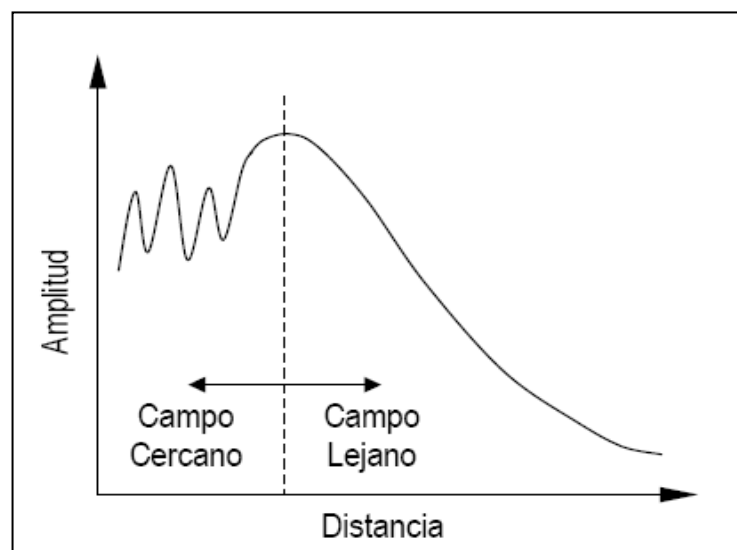


Figura 1.14 Curva de respuesta de amplitud de un transductor típico

1.11 Transductores o palpadores

Un transductor es cualquier dispositivo que convierte una forma de energía a otra. Un transductor ultrasónico convierte la energía eléctrica en energía mecánica, en forma de sonido, y viceversa. Los principales componentes son el elemento activo, respaldo y la placa de desgaste.

1.11.1 El elemento activo

El elemento activo, que es el material piezoeléctrico o ferroeléctrico, convierte la energía eléctrica como un pulso de excitación de un detector de fallas en energía ultrasónica. Los materiales más utilizados son cerámicos polarizados que se puede cortar en una variedad de maneras para producir diferentes modos de onda. Los nuevos materiales tales como polímeros y materiales compuestos piezoeléctricos también se emplean para aplicaciones en las que proporcionarán un beneficio para el rendimiento del transductor y del sistema. En la *Figura 1.15* se muestra se muestra los componentes del mismo.

1.11.2 Respaldo

El soporte es generalmente un gran atenuante, material de alta densidad que se utiliza para el control de la vibración del transductor mediante la absorción de la energía que irradia de la cara posterior del elemento activo. Cuando la impedancia acústica del respaldo coincida con la impedancia acústica del elemento activo, el resultado será un transductor muy amortiguado que muestra buena resolución de la gama, pero puede ser

menor en amplitud de la señal (ver *Figura 1.16*). Si hay un desajuste en la impedancia acústica entre el elemento y el respaldo, la energía más el sonido se refleja hacia adelante en el material de prueba. El resultado final es un transductor que es menor en la resolución debido a una mayor duración de forma de onda, pero puede ser mayor en amplitud de la señal o de mayor sensibilidad.

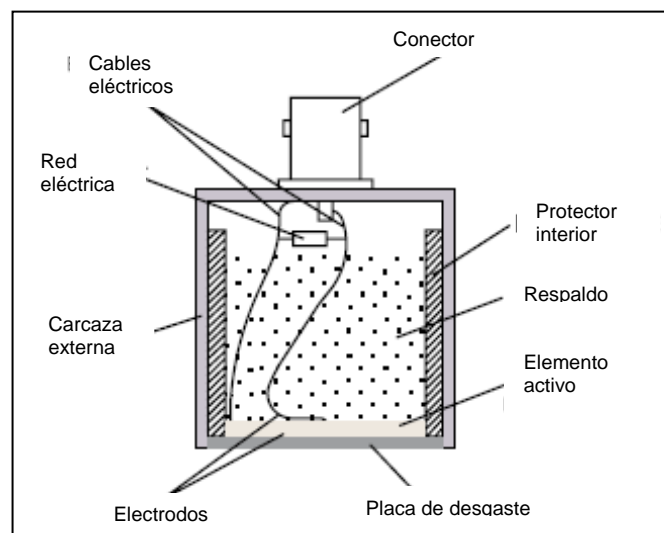


Figura 1.15 Partes de un transductor

1.11.3 Placa de desgaste

El propósito básico de la placa de desgaste del transductor es proteger el transductor del entorno de ensayo. En el caso de palpadores de contacto, la placa de desgaste debe ser de un material durable y resistente a la corrosión con el fin de soportar el desgaste causado por el uso de materiales como el acero.

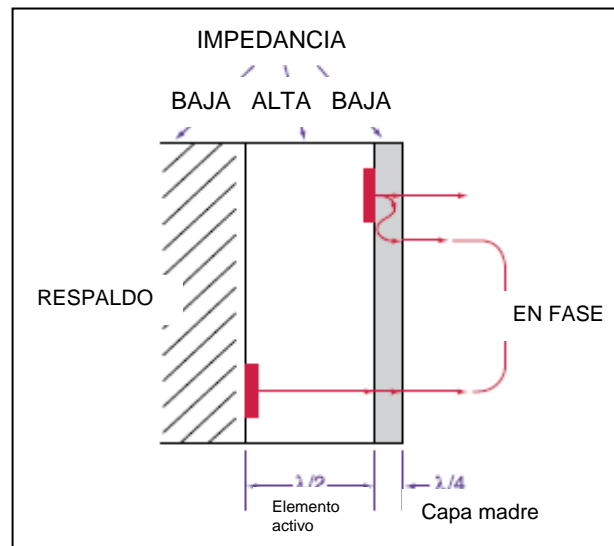


Figura 1.16 Partes específicas de un transductor

Los transductores o palpadores pueden ser clasificados como transductores normales y angulares, tales como se muestran en las *Figuras 1.17 y 1.18*.



Figura 1.17 Palpadores normales



Figura 1.18 Palpador angular

1.12 Técnicas de ensayo

En general, hoy en día las inspecciones por ultrasonido se realizan por la técnica pulso-eco. Describiremos a continuación las tres técnicas.

1.12.1 Técnica de reflexión o pulso-eco

Esta técnica se basa en el principio de reflexión del haz ultrasónico incidente. La energía de excitación ultrasónica es aplicada al cristal en forma de pulsos cortos, repetidos con una frecuencia que permite al sistema detectar entre pulso y pulso la energía ultrasónica reflejada en cualquier interface existente en el interior de la pieza metálica.

La intensidad o altura del pico de la discontinuidad, así como su resolución será mayor cuanto más perpendicular sea el haz ultrasónico incidente con el plano mayor de la probable discontinuidad. Se utiliza un solo transductor que envía y recibe el pulso (transmisor y receptor), por lo que se requiere acceso a una sola superficie, la *Figura 1.19* ilustra este modo de inspección. Esta técnica también puede ser realizada por inmersión; esto es, pieza y palpador inmersos dentro del agua por ejemplo.

1.12.2 Técnica de transmisión

En esta técnica se utiliza un transductor transmisor y un transductor receptor, solo que en este caso se encuentran localizados en superficies opuestas. En este modo de inspección el pulso viaja a través de la pieza inspeccionada y es recibido en la superficie opuesta al transmisor, *Figura 1.20*. La alineación entre los transductores es crítica. La presencia de una discontinuidad es revelada por una disminución de la energía ultrasónica que llega al receptor.

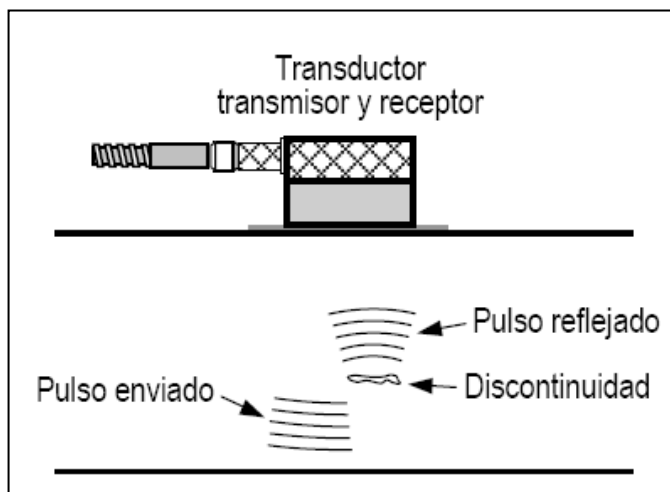


Figura 1.19 Técnica de pulso - eco

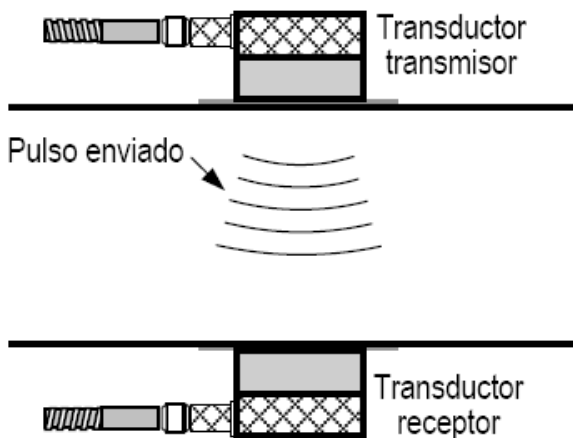


Figura 1.20 Técnica de transmisión

1.12.3 Técnica de resonancia

Esta técnica utiliza haz continuo de ondas longitudinales transmitido en materiales planos desde una de las caras. La frecuencia es variada en forma manual o automática hasta que una onda es reflejada dos veces y deja la

primera cara o superficie del material en fase con otra onda que ingresa. Entonces se instalan así ondas estacionarias en la pieza plana obligándolos a resonar o vibrar con mayor amplitud. Si el espesor de la pieza es de media longitud de onda entonces la placa entra en resonancia. La resonancia es indicada por su efecto de carga sobre el transductor ultrasónico acoplado al material.

1.13 Métodos de barrido

1.13.1 Barrido tipo A (A-Scan)

La mayoría de instrumentos en uso cuentan con una presentación básica tipo “A”, también conocida como barrido tipo “A”, como se muestra en la *Figura 1.21*. Estos instrumentos pueden contar ya sea con una pantalla electroluminiscente, de cristal líquido, de video o un tubo de rayos catódicos. El barrido “A” está basado en la presentación de una relación tiempo-amplitud. La presencia de discontinuidades es representada por medio de “ecos, picos, reflexiones o indicaciones” sobre la pantalla. Con esta presentación se puede determinar:

- ✓ La profundidad o posición en la que se encuentra una discontinuidad, o el espesor de un material, y
- ✓ La magnitud de una discontinuidad.

La presentación tipo “A” está compuesta por dos escalas:

EHP - Escala horizontal de la pantalla. Está compuesta por 10 divisiones equidistantes, y cada división se compone por 5 subdivisiones, lo cual proporciona un total de 50 subdivisiones. En esta escala se mide el tiempo de recorrido de la onda ultrasónica dentro del material, desde la superficie de entrada y hasta alguna discontinuidad y / o la superficie posterior.

En situaciones prácticas de inspección se utiliza como escala de distancia, por lo que se emplea para:

- ✓ Determinar la profundidad a la que se encuentra una discontinuidad,
- ✓ Medir la distancia recorrida por el ultrasonido, y
- ✓ Medir espesores de pared.

EVP - Escala vertical de la pantalla. Está compuesta por 100 divisiones repartidas ya sea en 5 o 10 partes equidistantes, expresa porcentaje (%) de altura o amplitud. En general, la amplitud de las señales representa la intensidad de la onda transmitida o reflejada por discontinuidades o superficies de pared.

En situaciones prácticas de inspección se utiliza para estimar y evaluar la magnitud de las discontinuidades, la atenuación en materiales, la divergencia del haz y otros factores, basándose en amplitudes de indicaciones de:

- ✓ Reflectores de referencia,
- ✓ Discontinuidades, y

- ✓ Reflexiones de pared posterior.

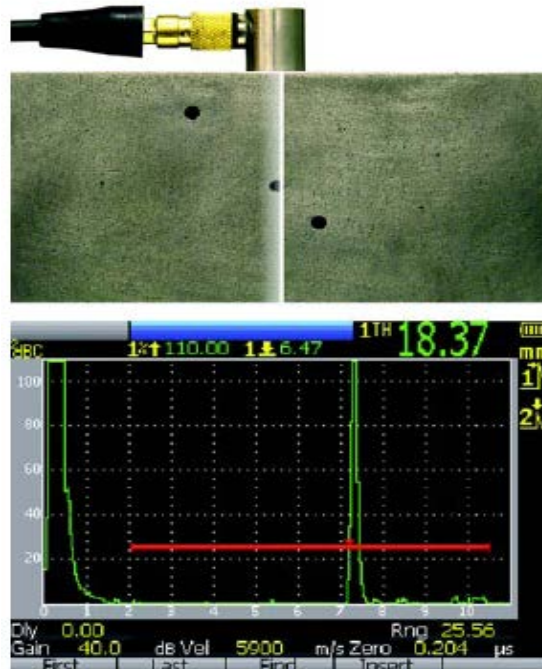


Figura 1.21 Barrido tipo A (A-Scan)

1.13.2 Barrido tipo B (B-Scan)

Cuando es de interés observar la forma a lo largo de una discontinuidad o su distribución a través de la sección transversal de una pieza, la presentación tipo “B” puede ser utilizada. La presentación tipo “B” muestra la sección transversal del material que está siendo inspeccionado. La *Figura 1.22* muestra un instrumento ultrasónico portátil con presentación “B”.

Además de los componentes básicos de la unidad con presentación tipo “A”, se debe contar con algunas funciones adicionales:

- ✓ Modulación de la intensidad o brillantez por puntos en la pantalla, en proporción a la amplitud de la señal de la discontinuidad.
- ✓ Deflexión del trazo en la pantalla en forma sincronizada con el movimiento del transductor a lo largo de la pieza inspeccionada.
- ✓ Retención de la imagen sobre la pantalla.

En la pantalla se tiene como referencia la superficie frontal y posterior de la pieza inspeccionada, y se obtienen los datos de la longitud y profundidad de las discontinuidades.

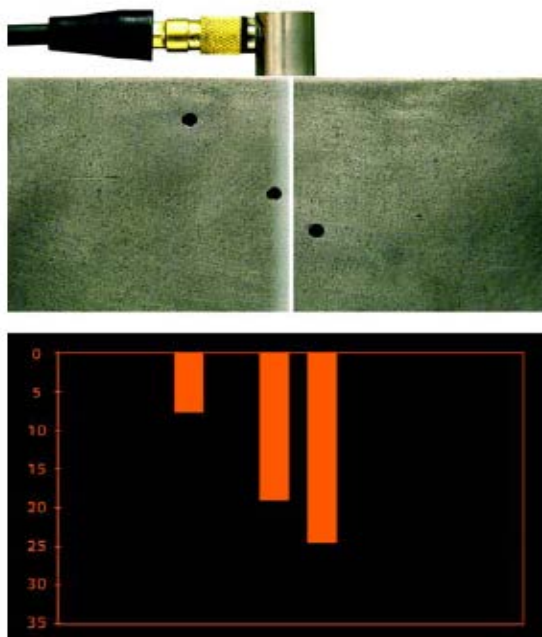


Figura 1.22 Barrido tipo B (B-Scan)

1.13.3 Barrido tipo C (C-Scan)

Este tipo de presentación es una vista de planta, o sea, una vista superior en forma de mapa, similar a una imagen radiográfica. En la pantalla se muestra

la proyección de los detalles internos, si existe una discontinuidad se obtiene el contorno de la misma. La *Figura 1.23* muestra la presentación tipo “C”. En este barrido no se utilizan las reflexiones frontal y posterior, solo las reflexiones de las discontinuidades, la presentación tipo “C” es desarrollada utilizando un patrón de barrido (X contra Y).

Es usado, y particularmente efectivo, para materiales planos incluyendo productos rolados, paneles en forma de panel y productos compuestos laminados o adheridos.

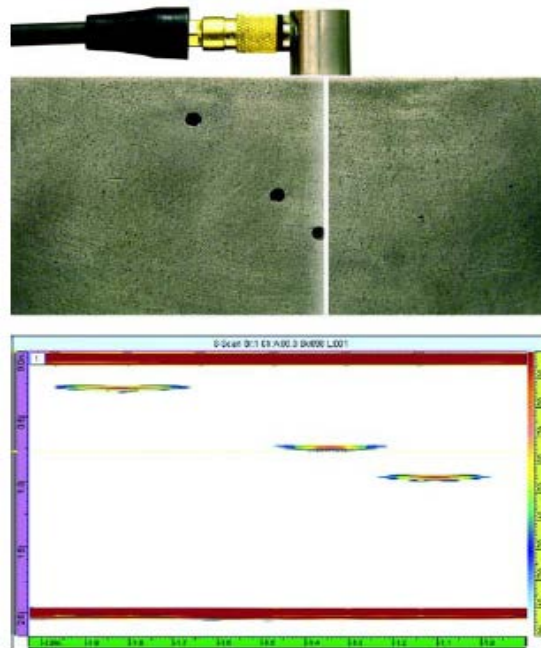


Figura 1.23 Barrido tipo C (C-Scan)

CAPITULO II

REQUERIMIENTOS GENERALES

2.1 Calificación de Inspectores

Los inspectores serán entrenados y calificados como nivel I ó II de acuerdo con los requisitos de la ASNT (American Society for Nondestructive Testing), procedimiento SNT-TC-1A¹¹ (Ver anexo para certificado de nivel en ultrasonido).

2.2 Aplicación del ensayo de ultrasonido

De acuerdo a las especificaciones del proyecto, cumpliéndose con los requerimientos del código AWS D1.1¹², el ensayo de ultrasonido se aplicará en la inspección de juntas soldadas de canal y zonas afectadas por el calor, ZAC, de componentes no tubulares entre los espesores de 8 mm a 75 mm.

¹¹ Recommended Practice No. SNT-TC-1A, *Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing*, 2006.

¹² American Welding Society, *Structural welding Code – Steel*, 222 (2008)

2.3 Condiciones requeridas de la superficie de ensayo y métodos de preparación

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 el material base debe estar limpia y libre de rugosidades excesivas, ondulaciones, óxidos, salpicaduras de soldaduras y pinturas, etc.

- a) Si fuera necesario las superficies podrán ser esmeriladas, escobilladas, raspadas o preparadas de alguna forma para ejecutar el ensayo.
- b) 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.

2.4 Acoplante

Como acoplante entre la superficie del material base y el transductor se utiliza una base de metil-celulosa diluida en agua (pegamento para papel de pared – marca NORTE SUR DE COMERCIO EXTERIOR S.A.C.). El acoplante sirve como un medio uniforme entre la superficie de escaneo y el transductor para garantizar la transmisión de las ondas sonoras.

2.5 Equipo de ultrasonido

Los equipos de ultrasonido que cuenta la empresa NDT se dan en la *Tabla 2.1* y debe cumplir con los siguientes:

- a) El equipo de ultrasonido será del tipo pulso-eco adecuado para usarlo con transductores que oscilan en frecuencias entre 1 a 6 Mhz. La pantalla tendrá la presentación de video A-scan rectificado.
- b) La linealidad horizontal del equipo será calificado sobre la distancia de recorrido total a ser usado en el ensayo (Ver anexo, hoja de linealidad horizontal).
- c) El equipo tendrá un control de ganancia calibrado (atenuador) ajustable en pasos discretos de 1 a 2 dB sobre un rango de al menos 60 dB.
- d) el rango dinámico de la pantalla del equipo será tal que una diferencia de 1 dB de amplitud puede ser fácilmente detectado en la pantalla.

Tabla 2.1 Equipos de ultrasonido de la propiedad de NDT¹³

FABRICANTE	MODELO (*)
SONATEST	SITESCAN 150
SONATEST	SITESCAN 140
SONATEST	MASTERSCAN 333
KRAUKRAMER	PHASOR XS
KRAUKRAMER	USN 60

(*) Todos digitales con interfase a computadora

¹³ Procedimiento de ensayo de ultrasonido, según AWS D1.1/D1.1M – 2008, Tabla 8.1, 4

2.6 Transductores

- a) Los transductores de haz normal tendrán un área activa de no menos que $\frac{1}{2}$ pulg.² (323 mm²) y no más que 1 pulg.² (645 mm²). El transductor será redondo o cuadrado.
- b) Los transductores de haz angular serán cuadrados o rectangulares en forma y pueden variar de 5/8" a 1". (15 mm a 25 mm) en ancho y de 5/8" A 13/16" (15 mm a 20 mm) en altura. La máxima relación de ancho a altura será de 1.2 a 1.0 y la mínima relación de ancho a altura será de 1.0 a 1.0.
- c) Los transductores producirán un haz sónico en el material en ensayo dentro de más o menos 2° de uno de los ángulos propios de 70°, 60° ó 45°.
- d) Los transductores tendrán frecuencias entre 2 y 2.5 MHz.

Se utilizarán 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 propiedad de la empresa NDT¹⁴

Marca	Modelo	Tipo	Diámetro	Ángulo	Frecuencia
TECHNISONIC(*)	ABS-020505-AWS	Normal	0.62"x0.62"	0°	2.25 MHz
TECHNISONIC	C-0208-HR	Normal	1.0"	0°	2.25 MHz
GENERAL ELECTRIC	B2S	Normal	24 mm	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.

¹⁴ Procedimiento de ensayo de ultrasonido, según AWS D1.1/D1.1M – 2008, Tabla 9.1, 4

CAPITULO III

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE ULTRASONIDO

3.1 Calibración del equipo de ultrasonido

3.1.1 Posición del control de rechazo (reject)

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

3.1.2 Técnica

La calibración para la sensibilidad y el recorrido horizontal (distancia) será hecha por el operador de ultrasonido justo antes y en la ubicación del ensayo de la soldadura.

3.1.3 Recalibración

La recalibración será hecha después de un cambio de operador, cada 8 horas de intervalo máximo de tiempo, o cuando el circuito eléctrico es perturbado. La perturbación se produce: cuando se cambia el transductor, cuando se cambia la batería, cuando se cambia el enchufe eléctrico, cuando se cambia el cable coaxial, o por interrupción de la energía

3.1.4 Calibración con haz normal

La calibración para el ensayo con haz normal del metal base será hecha con el palpador aplicado en la cara de barrido del metal base y realizado como sigue:

a) 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 de espesor de la plancha en la pantalla del equipo de ultrasonido. La calibración se realiza usando el bloque patrón V1 (patrón IIW); *Figura 3.1*¹⁵.

- 1) El transductor será fijado en la posición G del patrón V1 (*Figura 3.1*).
- 2) El instrumento será ajustado para producir indicaciones a 1" (25 mm), 2" (50 mm), 3" (75 mm), 4" (100 mm), etc., en la pantalla.

¹⁵ American Welding Society, *Structural welding Code – Steel*, Figura 6.23, 273 (2008)

b) Amplitud (sensibilidad)

- 1) El transductor será fijado en la posición G del patrón V1 (*Figura 3.1*).
- 2) La ganancia será ajustada hasta que la indicación maximizada a partir de la primera reflexión de fondo alcance de 50 a 75% de la altura de la pantalla.

c) Resolución

- 1) El transductor será fijado en la posición F del patrón V1
- 2) El transductor y el equipo deberán distinguir las tres distancias.

La linealidad horizontal del equipo de ultrasonido será recalificado cada 2 meses de uso 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 2 meses.

3.1.5 Calibración con haz angular

La calibración para el ensayo con haz angular será realizada como sigue:

a) Punto de salida del haz (Index Point)

El punto de salida del haz desde el transductor será localizado o verificado por el procedimiento siguiente:

- (1) El transductor será colocado en la posición D en el patrón V1 como se muestra en la *Figura 3.1*).
- (2) 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 de centro de la curvatura del patrón de calibración, es el punto de salida del haz.

b) Determinación del Ángulo

El ángulo de la trayectoria del sonido del transductor será comprobado o determinado por uno de los siguientes procedimientos:

- ✓ Fijando el transductor en la posición B del patrón V1 para los ángulos de 40 a 60°, o en la posición C para los ángulos de 60 hasta 70° (Ver *Figura 3.1*).
- ✓ Para el ángulo seleccionado, mover el transductor hacia adelante y hacia atrás sobre la línea indicativa del transductor, hasta que la señal de la indicación en la pantalla se maximice. El punto de salida del haz en el transductor será comparado con la marca del ángulo en el patrón de calibración (tolerancia $\pm 2^\circ$).

c) Procedimiento de calibración de la distancia

El recorrido horizontal será ajustado para representar la distancia real de la trayectoria del sonido usando el bloque patrón V1, o patrones alternativos

aprobados. La calibración de la distancia será hecha usando ya sea escalas de 5" (125 mm) ó 10" (250 mm) en la pantalla, cualquiera que sea la más apropiada. Sin embargo, si la configuración de la junta o el espesor evitan el examen completo de la soldadura con cualquiera de estos ajustes, la calibración de la distancia será hecha usando escalas de 15" ó 20" (400 ó 500 mm) según sea lo requerido.

d) Amplitud o procedimiento de calibración de la sensibilidad

El transductor será fijado en la posición A del patrón V1 (para cualquier ángulo). La máxima señal de la indicación originada por el agujero de diámetro 0.060" (1.5 mm) deberá ser ajustada para lograr una indicación a la altura del nivel de referencia deseado. La lectura en decibeles obtenida para llevar la indicación a esta altura será usada como el "nivel de referencia, b" en el informe de ensayo por ultrasonido, AWS D1.1 – 2008 Anexo M, Formato M-11.

e) 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° y la posición S para el ángulo de 45°. Como consecuencia, el transductor y el equipo deberán distinguir los tres agujeros de prueba, por lo menos al grado de distinguir los picos de las indicaciones de los tres agujeros.

f) Reflexiones internas

Después de calibrar el equipo según los pasos a, b, c y d retirar el transductor y dejarlo al costado del equipo de ultrasonido sin hacer cualquier ajuste o modificación. Luego aumentar la ganancia en 20 dB más que el nivel de referencia de sensibilidad calibrada. Se debe observar el área de la pantalla más allá de 12 mm del recorrido del haz y la altura sobre el nivel de referencia, en el cual no debe existir cualquier indicación para que sea aceptada dicho equipo.

3.1.6 Distancia de acercamiento de la unidad de búsqueda (Transductor)

La distancia mínima permisible entre el pie de la unidad de búsqueda y el borde del patrón V1 (PATRON IIW) será como sigue (Ver *Figura 3.2*¹⁶):

Para el transductor de 70°

X = 2" (50mm)

Para el transductor de 60°

X = 1-7/16" (37mm)

Para el transductor 45°

X = 1" (25mm)

¹⁶ American Welding Society, *Structural welding Code – Steel*, Figura 6.18, 267 (208)

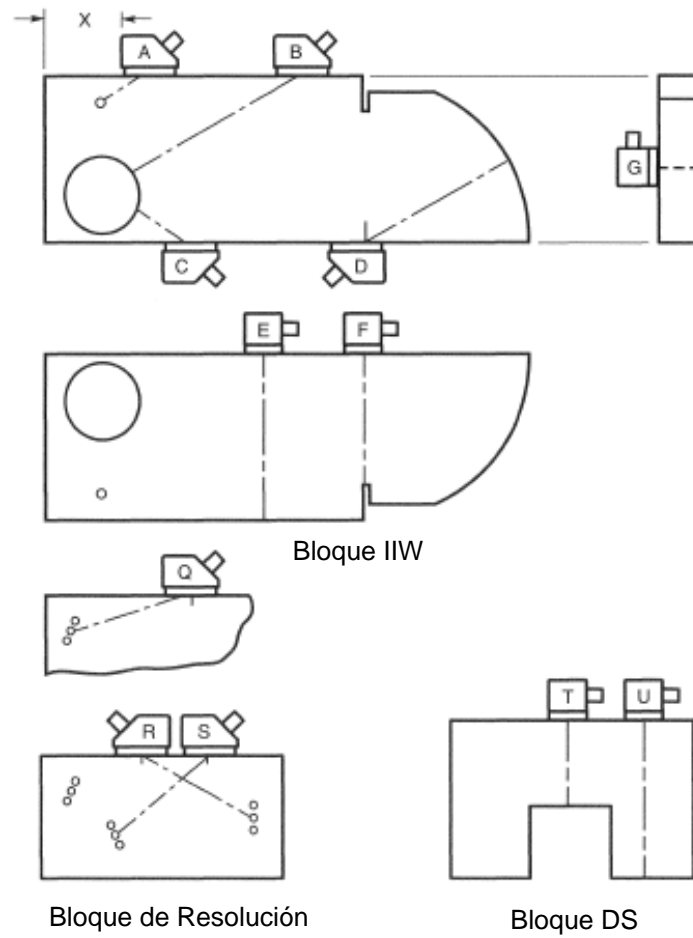


Figura 3.1 Posiciones del transductor para realizar la calibración del equipo

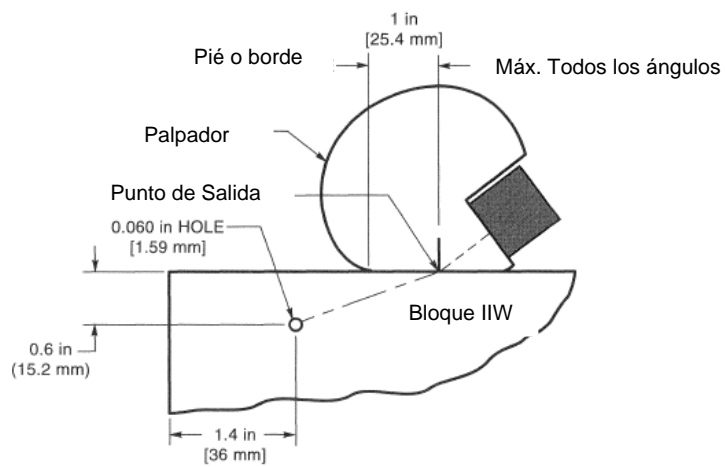


Figura 3.2 Distancia mínima de acercamiento de la unidad de búsqueda

3.2 Técnica operacional del ensayo

3.2.1 Línea “X”

Una línea “X” para la localización de las discontinuidades deberá ser marcada en la cara ensayada de la soldadura en una dirección paralela y sobre el eje de la soldadura. La medida de la distancia perpendicular desde el eje de la soldadura está basada en las dimensiones de las figuras y los detalles de los planos y usualmente la línea X se ubica en la línea central del bisel de la soldadura, en el caso de juntas a filete y juntas en T, esta línea se ubica en la zona cercana a la cara que conecta a las partes (la cara opuesta a la cara C); la *Figura 3.3* muestra la ubicación de la línea X.

3.2.2 Línea “Y”

Una línea “Y” acompañada con un número de identificación de la soldadura deberá ser claramente marcada sobre el metal base y adyacente a la soldadura que será ultrasónicamente ensayada.

Esta marca es usada para los siguientes propósitos:

- 1) Identificación de la soldadura.
- 2) Identificación de la cara A.
- 3) Medida de la distancia y dirección (+ o -) desde la línea “X”.
- 4) Punto de referencia desde los extremos o bordes de la soldadura

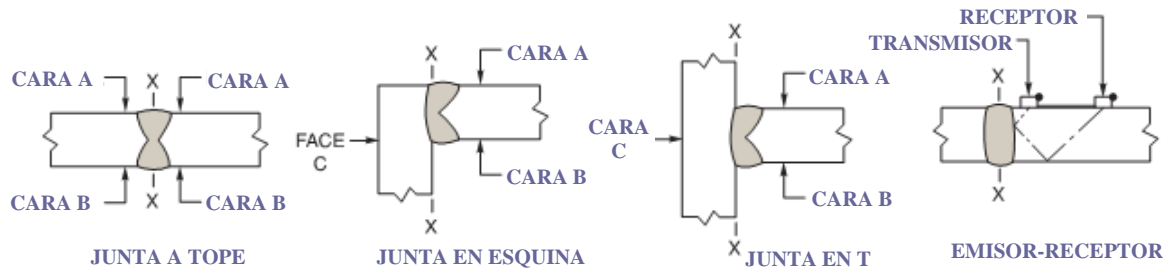


Figura 3.3 Ubicación de la Línea "X" y las Caras de Barrido en Distintos Tipos de Juntas¹⁷

3.2.3 Extensión 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.

3.2.4 Tamaño del Reflector

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

¹⁷ American Welding Society, *Structural welding Code – Steel*, Figura 6.7, 238 (2008)

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.

3.2.5 Inaccesibilidad

Si una parte de la soldadura es inaccesible para realizar el ensayo, debido al contenido laminar registrado de acuerdo con 3.2.4, 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. Un procedimiento es que la superficie de la soldadura sea esmerilada, un segundo procedimiento es que el ensayo sea realizado por las caras A y B, y como tercer procedimiento alternativo se deberán usar transductores de diferentes ángulos.

3.2.6 Ensayo de Soldaduras

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 3.3*. 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 3.1 Incremento de Sensibilidad para Componentes No Tubulares Sometidos a Carga Estática¹⁸

Niveles de escaneo	
Recorrido del haz en pulg. (mm)	Sobre el nivel de referencia, dB
Hasta 2 ½ [65 mm]	14
Desde 2 ½ hasta 5 <65-125 mm]	19
Desde 5 hasta 10 <125-250 mm]	29
Desde 10 hasta 15 <250-380 mm]	39

Tabla 3.2 Incremento de Sensibilidad para Componentes No Tubulares Sometidos a Carga Dinámica¹⁹

Niveles de escaneo	
Recorrido del haz en pulg. (mm)	Sobre el nivel de referencia, dB
Hasta 2 ½ [65 mm]	20
Desde 2 ½ hasta 5 <65-125 mm]	25
Desde 5 hasta 10 <125-250 mm]	35
Desde 10 hasta 15 <250-380 mm]	45

¹⁸ American Welding Society, *Structural welding Code – Steel*, Tabla 6.2, 234 (2008)

¹⁹ American Welding Society, *Structural welding Code – Steel*, Tabla 6.3, 235 (2008)

3.2.7 Escaneo

El ángulo de ensayo y el procedimiento de escaneo deberán estar de acuerdo con aquellos mostrados en la *Tabla 3.3*²⁰ y *3.4*²¹.

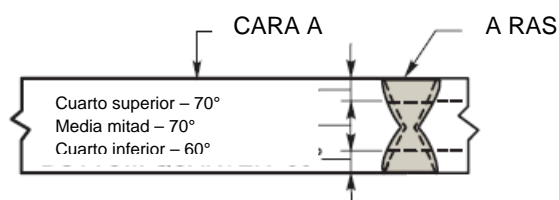
Tabla 3.3 Selección del procedimiento de escaneo de una unión soldada.																		
Mano de procedimiento																		
Espesor del material nulo (mm)																		
Tipo de soldadura	5/16 [8]		>1-1/2 [38]		>1-3/4 [45]		>2-1/2 [60]		>3-1/2 [90]		>4-1/2 [110]		>5 [130]		>6-1/2 [160]		>7 [180]	
	to	to	to	to	to	to	to	to	to	to	to	to	to	to	to	to	to	to
	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]									
	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Tope	1	O	1	F	1G or 4	F	1G or 5	F	6 or 7	F	8 or 10	F	9 or 11	F	12 or 13	F	12	F
T-	1	O	1	F or XF	4	F or XF	5	F or XF	7	F or XF	10	F or XF	11	F or XF	13	F or XF	—	—
Esquina	1	O	1	F or XF	1G or 4	F or XF	1G or 5	F or XF	6 or 7	F or XF	8 or 10	F or XF	9 or 11	F or XF	13 or 14	F or XF	—	—
Electrogas o electroescoria	1	O	1	O	1G or 4	1**	1G or 3	P1 or P3	6 or 7	P3	11 or 15	P3	11 or 15	P3	11 or 15	P3	11 or 15**	P3

²⁰ American Welding Society, *Structural welding Code – Steel*, Tabla 6.7, 238 (2008)

²¹ American Welding Society, *Structural welding Code – Steel*, Tabla 6.7, 239 (2008)

Tabla 3.4 Selección de los ángulos de ensayo según la tabla 3.3.

No.	Area del espesor de soldadura		
	Cuarto superior	Media mitad	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

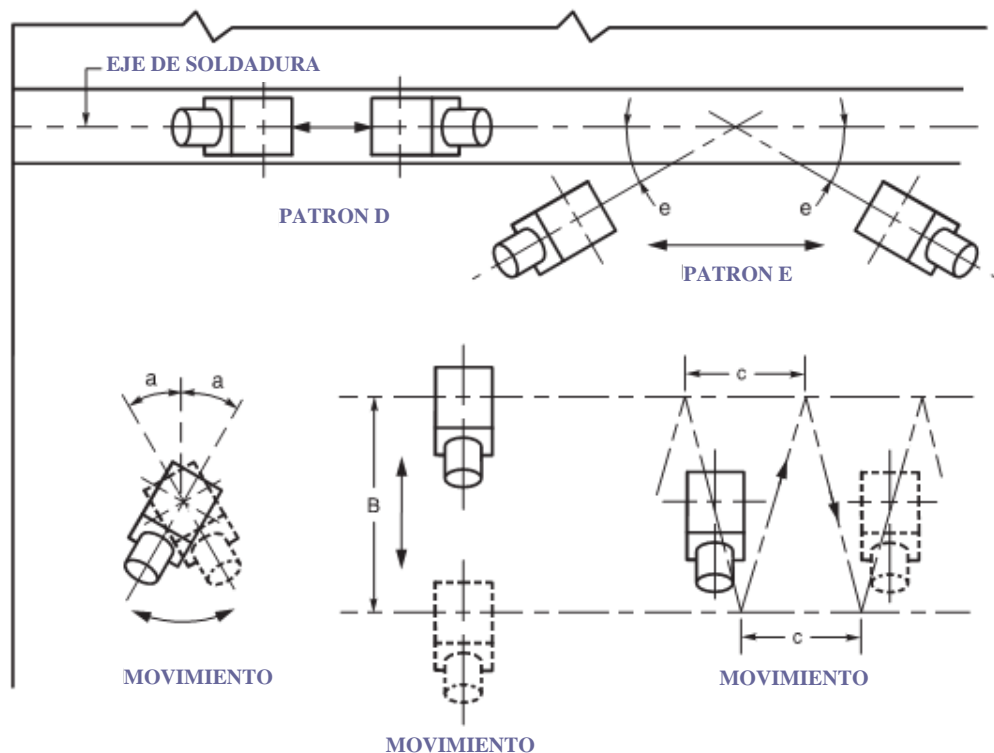


3.2.8 Juntas a Tope

Todas las soldaduras a tope serán ensayadas por cada lado del eje de la soldadura. Las soldaduras en esquinas y las juntas en T, serán ensayadas principalmente solamente de un lado del eje de la soldadura. Todas las soldaduras serán probadas usando el patrón o los patrones aplicables de exploración mostrados en la *Figura 3.4*²², los cuales son necesarios para la

²² American Welding Society, *Structural welding Code – Steel* Figura 6.21, 271 (2008)

detección de discontinuidades longitudinales y transversales. Se entiende que, como mínimo, todas las soldaduras sean probadas pasando el sonido a través del volumen completo de la soldadura y la ZAC en dos direcciones transversales, dondequiera que sean practicables.



Notas Generales:

1. Los patrones de prueba son todos simétricos alrededor del eje de la soldadura con excepción del patrón D, que será conducido directamente sobre el eje de la soldadura.
2. La prueba de ambos lados del eje de la soldadura será hecha donde sea mecánicamente posible.

Figura 3.4 Vista de Planta de Patrones de Exploración para UT

3.2.9 Nivel de indicación

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 “b” en el aparato de ultrasonido, dicho ajuste de decibeles será utilizado como el "nivel de la indicación, a." para calcular la clasificación de la indicación, d," como se muestra en el reporte del ensayo (Anexo M, Formato M-11, AWS D1.1-2008).

3.2.10 Factor de atenuación

El "factor de atenuación, c," en el reporte del ensayo de ultrasonido será obtenido restando 1" (25 mm) de la distancia del recorrido del sonido y multiplicando el residuo por 2 ó por 0.08 cuando se use unidades en milímetros. Este factor será redondeado al valor más cercano en dB. Los valores fraccionarios menores que ½ dB serán reducidos al nivel más bajo de dB y los de ½ dB al incrementarlos al nivel más alto.

3.2.11 Clasificación de indicaciones

La “clasificación de la Indicación d", en el informe de ultrasonido Anexo M, Formato M-11, AWS D1.1-2008, representa la diferencia algebraica en decibeles entre el nivel de la indicación contra el nivel de referencia con factor de atenuación según lo indicado en la expresión siguiente:

Instrumentos con ganancia en dB:

$$a - b - c = d \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

3.2.12 Longitud de las discontinuidades

a) Ensayo de haz angular (Transversal). El siguiente procedimiento será utilizado para determinar longitudes de las indicaciones que tienen una clasificación más seria que una indicación de la clase "d". 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.

Donde sea garantizado por la amplitud de la discontinuidad, este procedimiento será repetido para determinar las longitudes de las discontinuidades de clases A, B y C.

3.2.13 Bases para la aceptación o rechazo

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 6.2 para estructuras estáticamente cargadas (dadas en el código AWS D1.1 – 2008 Parte F).

Solamente las discontinuidades que son rechazadas necesitan ser registradas en los informes de ensayo, excepto para las soldaduras señaladas en los documentos del contrato como "fractura crítica" donde el grado aceptable está dentro de 6 dB incluido, la mínima clasificación rechazable será registrada en el informe de pruebas.

3.2.14 Identificación del área rechazada

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 defectuoso.

3.2.15 Reparación

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

3.2.16 Reportes de Reexamen

Luego de la reinspección de las zonas reparadas, debe emitirse un informe con el mismo número que el reporte original adicionando la letra "R" mas el número "1, 2, 3,....." y así sucesivamente tantas veces persista la reparación.

Deben registrarse todas las indicaciones conforme a los requerimientos de este procedimiento en la evaluación de resultados.

CAPITULO IV

APLICACIÓN DEL ENSAYO DE ULTRASONIDO

4.1 Habilitado de planchas

Las planchas para el ensayo de ultrasonido con haz normal se proveían en medidas de 25x1500x12000 mm, 25x3000x6000 mm, 32x1500x12000 mm, 32x2400x6000 mm, 38x2400x6000 mm, 50x3000x6000 mm, 50x2400x6000 mm, 50x1500x12000 mm, 63x2400x6000 mm y 75x2400x6000 mm. Las planchas con espesores menores que 25 mm no se realizaron el ensayo de ultrasonido con haz normal. Las planchas usadas para este proyecto fueron de la clasificación ASTM A-36.

El habilitado se realizó con equipos de oxicorte adecuados para dar las medidas requeridas de acuerdo a los elementos a fabricar. Los elementos a fabricar en su mayoría eran vigas prefabricadas y el ensayo de ultrasonido debía aplicarse cuando las uniones a tope con penetración total estaban listas antes de estructurar en forma de viga.

4.2 Ensayo de Ultrasonido

El ensayo de ultrasonido aplicado fue con los requerimientos de la AWS D1.1 – 2008 con carga estática. Se llevó a cabo de la siguiente manera:

4.2.1 Documentación

Las documentaciones solicitadas por parte del cliente antes de iniciar con el ensayo, en este caso Técnicas Metálicas, fueron los siguientes:

1. Certificado de calibración del equipo de ultrasonido.
2. Certificados de los patrones de calibración.
3. Certificados del personal.

4.2.2 Calificación del personal

La calificación del personal como nivel II en el ensayo de ultrasonido fue realizado de acuerdo a los requerimientos de la práctica recomendada de la ASNT, SNT-TC-1A - 2006.

4.2.3 Calificación de los equipos de ultrasonido

Como parte de la calificación del personal también el nivel III pidió que se demostrara que los equipos de ultrasonido a utilizar cumplan con los requisitos de la AWS D1.1 - 2008.

4.2.3.1 Procedimiento de calificación del equipo

Para la calificación de los equipos de ensayo ultrasónico se siguió todos los requerimientos dados en la parte F de la sección 6 de la AWS D1.1 – 2008. Se evaluó el equipo de ultrasonido PHASOR XS N/S 01W1PV conjuntamente con los transductores y cables coaxiales.

a) Selección de los ángulos de ensayo

La selección de los ángulos para el ensayo de las uniones soldadas a canal es de acuerdo al espesor y al tipo de unión entre planchas como se muestra en la *Tabla 3.3*.

b) Procedimiento de linealidad horizontal

El siguiente procedimiento se utilizó para la calificación de los equipos:

- (1) El transductor de haz normal fue acoplado en el bloque tipo IIW en la posición G para obtener 5 reflexiones de fondo en el rango inicialmente calificado.
- (2) El primer y la quinta reflexiones de fondo fueron ajustados a sus posiciones propias con el uso de los ajustes de calibración de distancia y el cero delay.
- (3) Cada indicación fue ajustado al 80% de la altura de pantalla con el control de ganancia para el examen de ubicación horizontal.
- (4) Cada localización intermedia de una indicación fue comparado dentro del 2% del ancho de la pantalla.

Los datos de la linealidad del equipo se muestran en el *anexo*.

c) Precisión del decibel

- (1) Un transductor de haz normal fue colocada sobre el bloque DS en la posición T (*Figura 3.1*).
- (2) La calibración de distancia fue ajustado tal que la indicación de la primera reflexión de fondo, 2" (50 mm), se ubique a la mitad de la pantalla horizontalmente.
- (3) El control de ganancia calibrado fue ajustado tal que la indicación esté exactamente en o ligeramente sobre el 40% de la altura de pantalla.
- (4) La unidad de búsqueda fue movido hacia la posición U hasta que la indicación esté en exactamente 40% de la altura de pantalla.
- (5) La amplitud del sonido fue incrementado en 6 dB con el control de ganancia calibrado. El nivel de indicación cae teóricamente en el 80% de la altura de pantalla.
- (6) El decibel leído fue reportado bajo "a" y el % de altura de pantalla real bajo "b" del paso 5 en el reporte de certificación (formato M-8, AWS D1.1).
- (7) La unidad de búsqueda fue movido hacia la posición U del bloque DS hasta que el nivel de indicación esté exactamente en 40% de la altura de pantalla.
- (8) Se repitió el paso 5.
- (9) Se repitió el paso 6, excepto que la información debe llenarse en la siguiente línea del formato.
- (10) Se Repitió los pasos 7, 8 y 9 consecutivamente hasta que el rango total del control de ganancia sea alcanzado (mínimo 60 dB).

(11) La información de las filas “a” y “b” fueron aplicados a la *ecuación 4.1* para calcular los decibeles corregidos.

(12) El decibel corregido del paso 11 en la columna “c” fue aplicado.

(13) El valor de la fila “c” fue sustraído del valor de la fila “a” y la diferencia en la fila “d”, el error de decibel fue aplicado.

(14) El error colectivo de decibeles “e” es establecido inicialmente por el valor más cercano a 0.0 del error de decibel “d”, y añadir colectivamente a los valores del error de decibel “d” horizontalmente colocando los subtotales en la fila “e”.

(15) Los valores de los errores colectivos “e” que se encuentren dentro de una ventana de 2 dB serán los aceptables para el cálculo del rango de aceptación del equipo.

$$dB_2 = 20 \times \log\left(\frac{\%_2}{\%_1}\right) + dB_1 \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

Donde: $\%_1$ = Valor de la fila “b”

$\%_2$ = Valor del promedio de la fila “b” descartando los tres primeros y los tres últimos.

dB_1 = Valor de la fila “a”

dB_2 = Valor de la fila “c”

Los valores de las filas a, b, c, d y e se encuentran dados en el formato M-9 de la AWS D1.1 adjunto en la parte del *anexo*.

4.4 Calibración con haz angular

La calibración del equipo con haz angular se realizó después de seleccionar el ángulo de ensayo de acuerdo con la *parte 3.1.5 (capítulo III)*, determinándose la secuencia como siguen:

1º Index point

2º Angulo de salida del haz

3º Calibración de distancia

4º Sensibilidad

5º Resolución

6º Reflexiones internas

4.5 Aplicación del método

Antes de abordar el ensayo de ultrasonido de un determinado cordón de soldadura, todo operario debe informarse sobre los siguientes puntos:

1. Clase de material a ensayar
2. Espesor del material
3. Preparación de bordes de la unión
4. Procedimiento de soldadura empleado
5. Si la soldadura ha sufrido algún tratamiento térmico o no
6. Existencia de respaldo en la raíz del cordón

Después de realizado la calibración general del equipo con la unidad de búsqueda adecuada, el siguiente paso fue calibrar el equipo con el espesor de la plancha a ensayar calculando el medio paso y el paso del recorrido del

haz; así como también el rango de pantalla y por consiguiente aumentar la ganancia de acuerdo a la *Tabla 3.1*.

Los cálculos del recorrido del haz y el medio paso se muestran en las *ecuaciones 4.2 y 4.3*, respectivamente.

$$s = \frac{T}{\cos\alpha} \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\frac{P}{2} = T \cdot s \dots\dots\dots (4.3)$$

Donde: s = recorrido del haz
 P/2 = medio paso
 T = espesor de material base

Ya realizado los ajustes en el equipo de ultrasonido con el espesor y el rango de pantalla se pasa a realizar el ensayo sobre la cara "A" de la plancha, marcando el punto de inicio del ensayo con la letra "y" como se muestra en la *Figura 4.1*.

4.6 Interpretación de resultados

El resultado final de una unión soldada por el ensayo de ultrasonido está dado por la interpretación grafica de una reflexión obtenida en la pantalla del equipo dentro de la zona de interés como se muestra en la *Figura 4.1*.

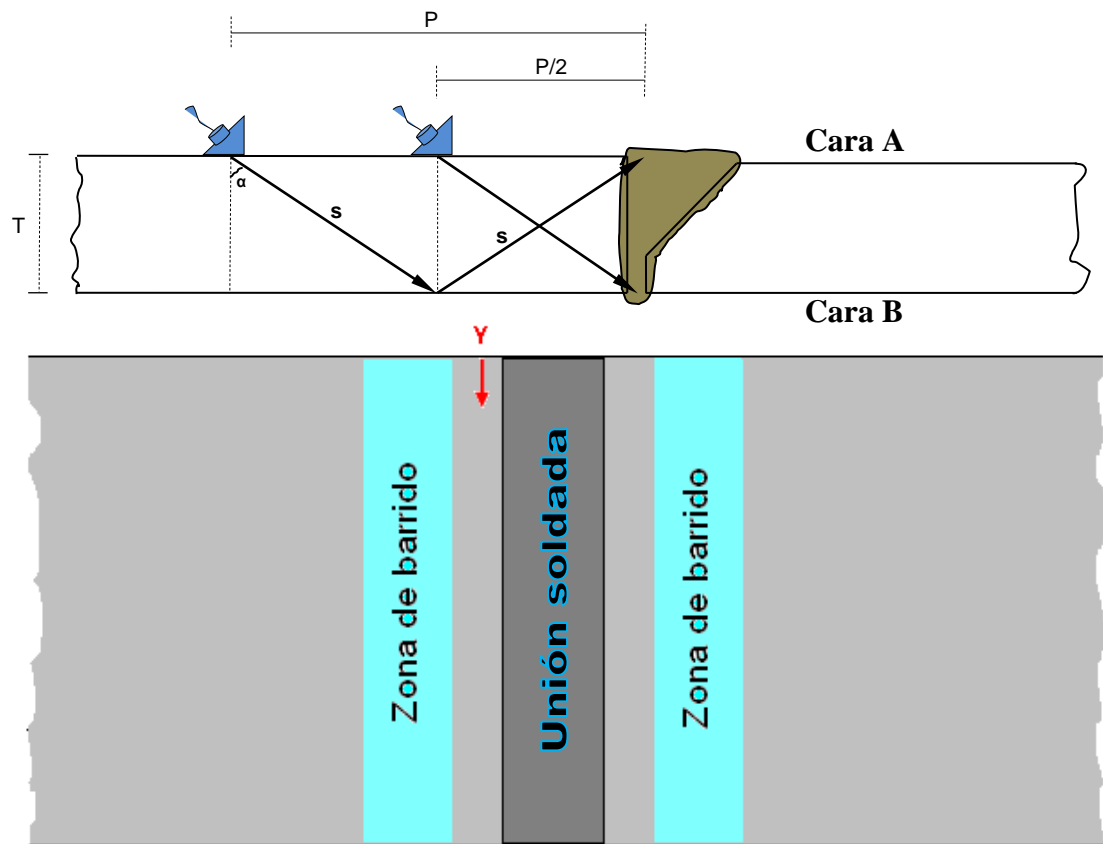


Figura 4.1. Se muestra una vista de perfil y de planta del método de inspección realizada por ultrasonido de una unión soldada.

Este análisis consta de interpretar los datos obtenidos en el equipo con los datos que se pueda medir físicamente. Básicamente el dato principal de análisis es el valor del “d” que nos da el equipo. Este valor se compara con los datos en la Tabla 3.1 y por consiguiente se puede decir que la unión soldada es aceptable o no aceptable.

En la *Figura 4.2* se presenta el resultado de una unión soldada, la cual presenta una discontinuidad relevante. Como se puede ver la presencia de una reflexión dentro de la zona representativa de la masa de la soldadura.

Este análisis es producto de la medición física de la ubicación de tal discontinuidad dentro del cordón de soldadura y el valor de “d” que nos da el equipo.

En la *Figura 4.3* presentamos la grafica de una unión soldada libre de discontinuidades relevantes. Esto es realizando un barrido en forma de zig-zag y con la ganancia de barrido aumentada de acuerdo a la tabla 3.1 para el espesor de plancha ensayada.

Todas las indicaciones relevantes fueron reportadas y marcadas en las planchas cercanas a las uniones soldadas como se muestra en la *Figura 4.4*. El modelo de reporte de ultrasonido que se presentó esta basado en el modelo de referencia de la AWS el cual se adjunta en el anexo I.

Los resultados del ensayo de ultrasonido realizado en las uniones soldadas de las estructuras de acero del proyecto Expansión Antamina fueron muy satisfactorios, solo el 5% de la totalidad (1500 vigas prefabricadas) de los elementos salieron no aceptables.

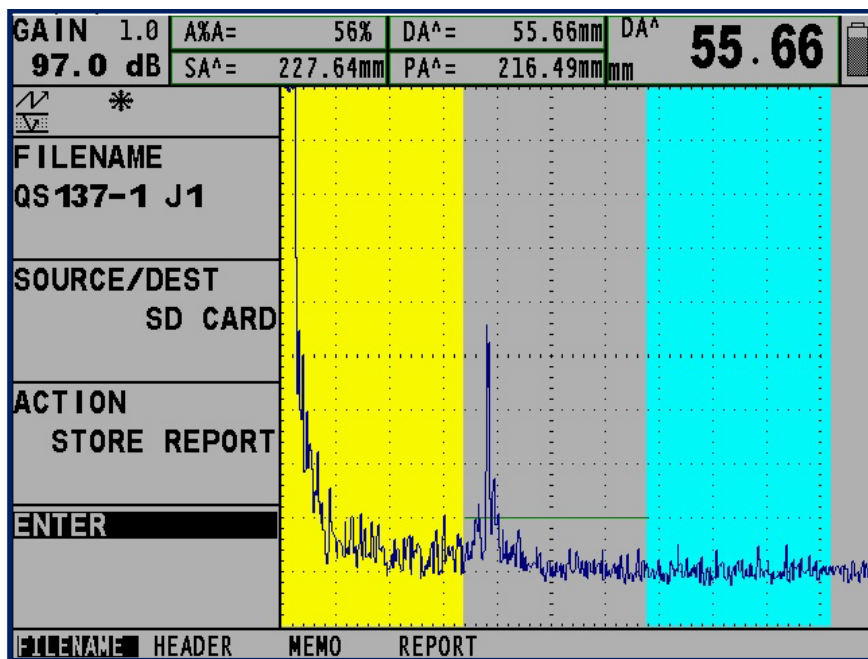


Figura 4.2 Se muestra la presencia de una indicación en la pantalla del equipo

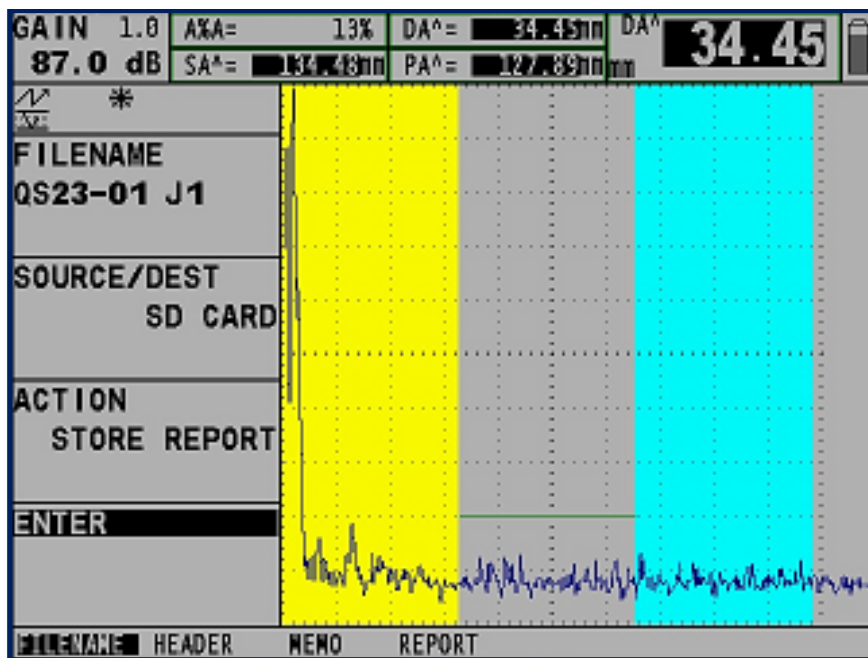


Figura 4.3 Se muestra la ausencia de indicaciones en la pantalla del equipo



Figura 4.4 Marcaje del resultado final después de la inspección de una unión soldada.

CONCLUSIONES

1. El código AWS D1.1 (*American Welding Society – Structural Welding Code-Steel*) se ha convertido en una herramienta vital para determinar la calidad de las uniones soldadas de estructuras por el método de ultrasonido.
2. El método de ultrasonido, según AWS D1.1, es relativamente fácil en su aplicación pero requiere de mucho entrenamiento del personal operador para su interpretación antes de dar el resultado final.
3. Los resultados por este método son inmediatos y no requieren ningún procesamiento adicional como es el caso de la radiografía o gammagrafía.
4. La interpretación gráfica de las reflexiones obtenidas en la pantalla del equipo es principalmente analítica y no comparativa.
5. Las indicaciones relevantes encontradas, discontinuidades que sobrepasan los criterios de aceptación, en las uniones soldadas fue básicamente presencia de escoria atrapada entre pase y pase de los cordones de soldadura.

6. La presencia de escoria en las uniones soldadas se corrigió realizando una limpieza adecuada y mayor concentración por parte de los soldadores de los contratistas.
7. El método de ultrasonido se puede aplicar cerca de personas ajenas a los operarios, es un método no dañino para la salud.

BIBLIOGRAFIA

- [1] **Benson carlín**, *Ultrasónica*, Ediciones URMO, España, 1972.
- [2] **León & Russo Ingenieros**, *Curso nivel I y II en ultrasonido*, Lima, 2005.
- [3] **NDT Tec. INC**, *Ultrasonic Inspection Technology*.
- [4] **Alfredo Naucevich**, *Aplicación de ensayos no destructivos en la industria*, 1996.
- [5] **Centro técnico Indura**, *Ensayos no destructivos modulo – Ultrasonido en soldaduras*, Lima, 2007.
- [6] **ASM Handbook**, *Nondestructive evaluation and quality control*, Novena edición, USA, 2001.
- [7] **Ricardo Echevarria**, *Ultrasonido*, 2002.
- [8] **Recommended Practice No. SNT-TC-1A**, *Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing*, 2006.
- [9] **American Welding Society**, *Structural welding Code – Steel*, twenty first edition, USA, 2008.

ANEXOS

FOTOGRAFIAS



Fotografía 1. Cable coaxial, transductores circular y rectangular y zapatas



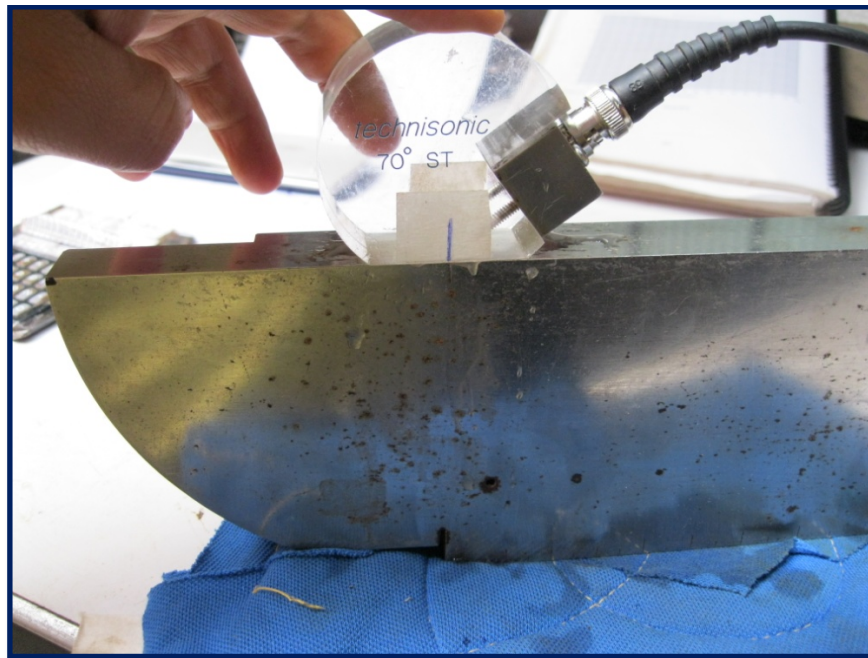
Fotografía 2. Equipo de ultrasonido PHASOR XS S/N 01W1PV.



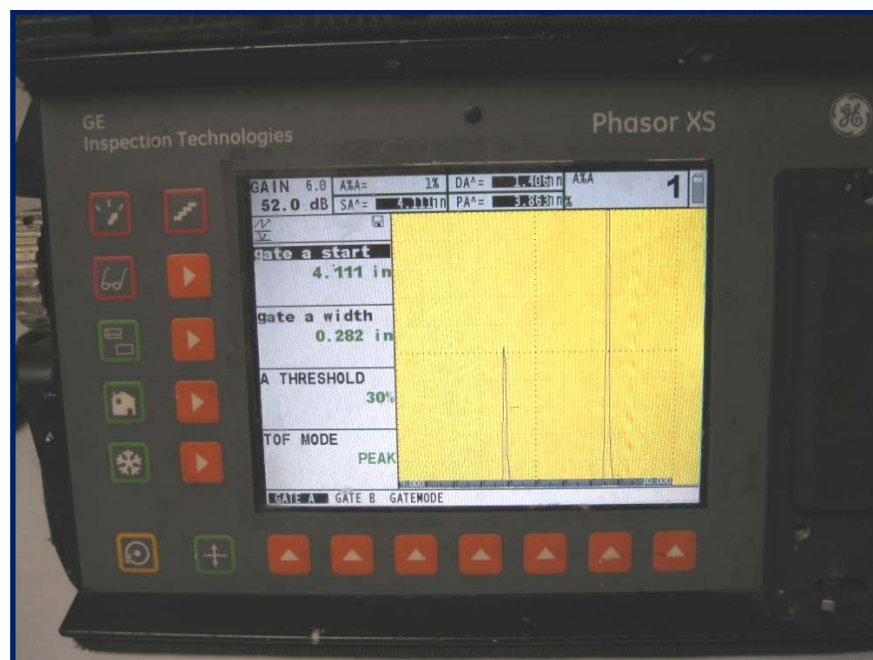
Fotografía 3. Patrón de calibración DS según AWS D1.1



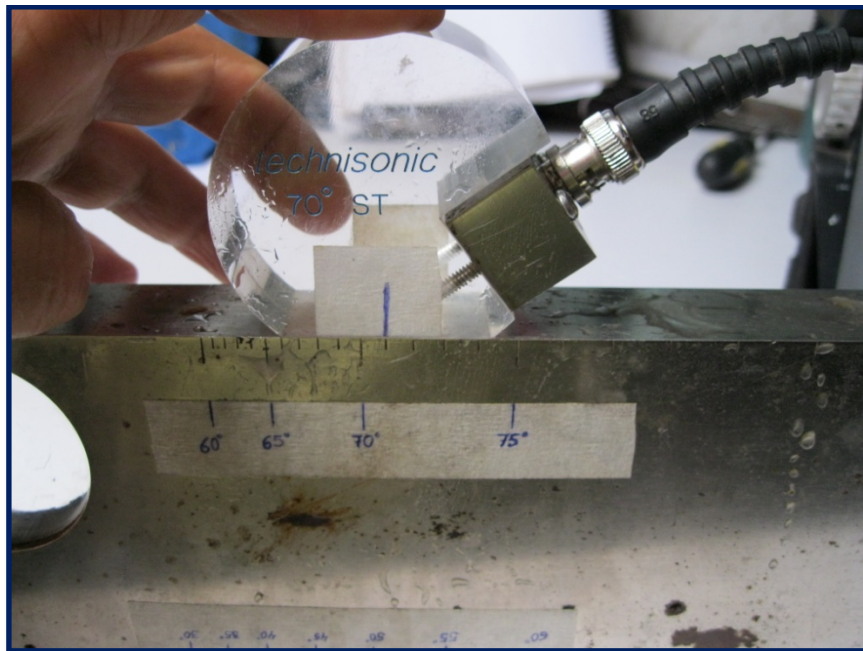
Fotografía 4. Patrón de calibración RC – Resolución - según AWS D1.1



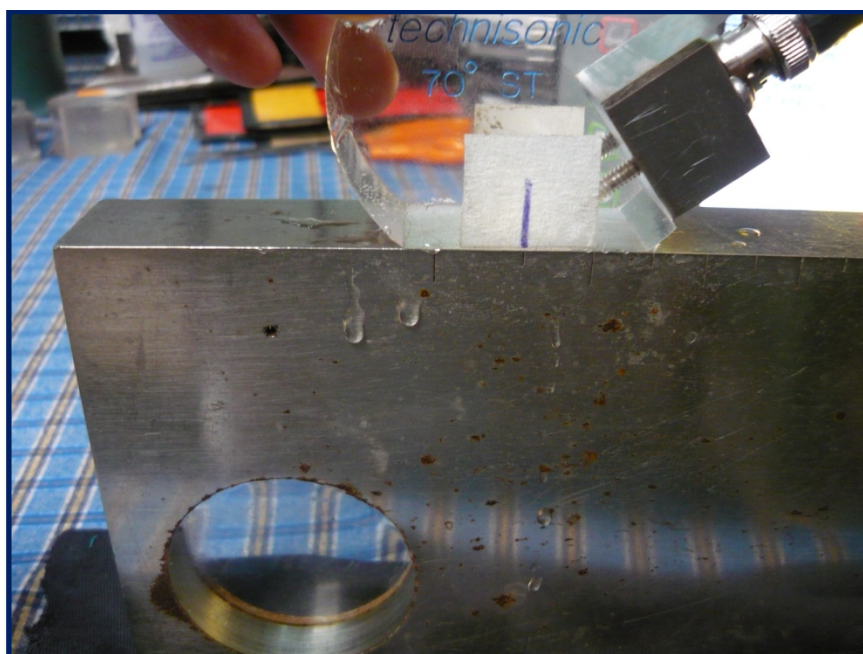
Fotografía 5. Posición de la unidad de búsqueda sobre el patrón de calibración IIW tipo 2 para la búsqueda del punto de salida del haz.



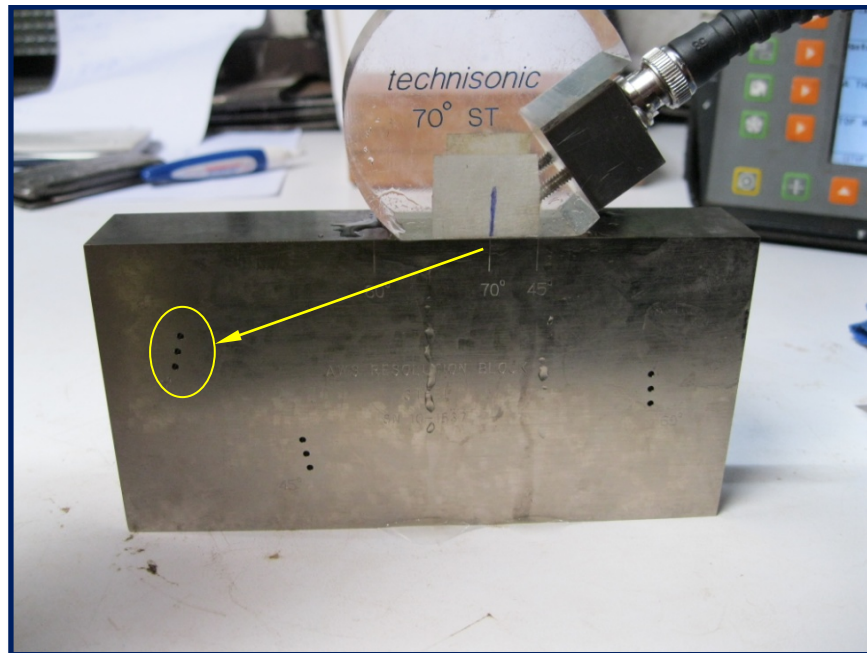
Fotografía 6. Máxima reflexión alcanzada cuando la unidad de búsqueda se ubica en la posición que muestra la fotografía 5.



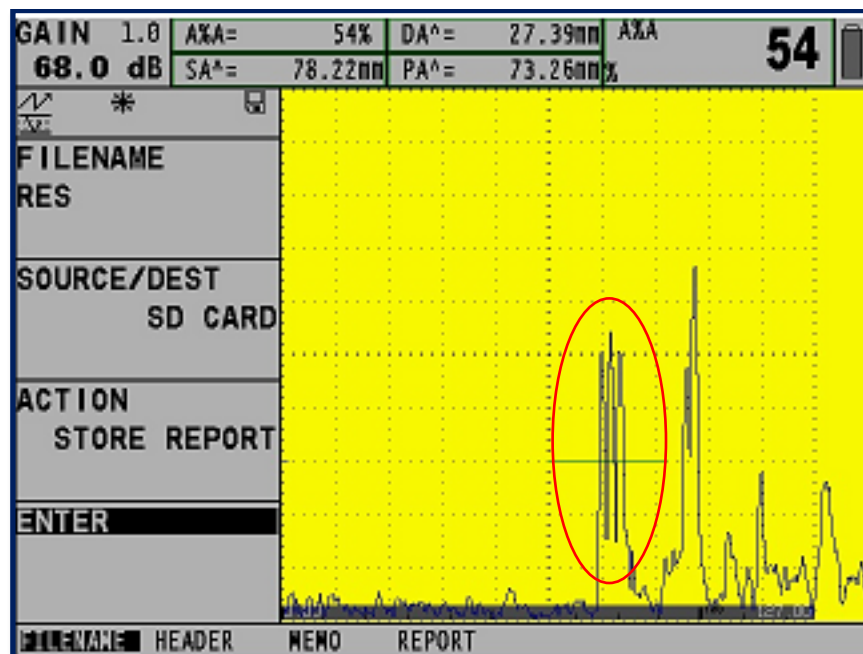
Fotografía 7. Posición de la unidad de búsqueda sobre el bloque IIW para encontrar el ángulo de refracción.



Fotografía 8. Posición de la unidad de búsqueda sobre el bloque IIW para la calibración del nivel de sensibilidad del equipo.



Fotografía 9. Posición de la unidad de búsqueda sobre el bloque RC para determinar la resolución del conjunto.



Fotografía 10. Se muestra la reflexión de los 3 agujeros mostrados en la fotografía 9.

CERTIFICADOS DE PERSONAL Y EQUIPO



NONDESTRUCTIVE TESTING

20547 Old Cutler Road PMB 206 Miami, Florida 33189
(305)246-4442 Fax (305)246-4644 ndtec@attglobal.net

Date: July 19, 2008

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

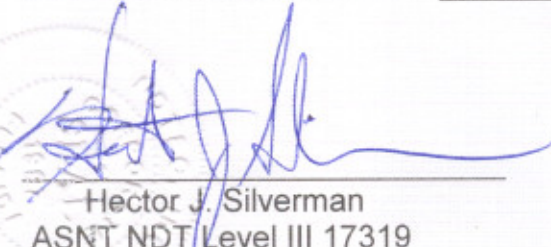
Angel Hugo Salazar Reyes

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>80.9</u>	<u>Hector J. Silverman</u>	<u>07-19-08</u>
<u>SPECIFIC</u>	<u>100</u>	<u>Hector J. Silverman</u>	<u>07-19-08</u>
<u>PRACTICAL</u>	<u>90.0</u>	<u>Hector J. Silverman</u>	<u>07-19-08</u>
<u>COMPOSITE SCORE</u>	<u>90.3</u>		

Certification Expiration Date: 07-19-13




Hector J. Silverman
ASNT NDT Level III 17319

245408478
Certificate Number

	<p style="text-align: center;">LINEALIDADES DE EQUIPO DE ULTRASONIDO</p>	R.L. N° 01
		FECHA: 07-04-10

PROYECTO: EXPANSIÓN ANTAMINA – AKER SOLUTION		
CLIENTE: TECNICAS METALICAS INGENIEROS S.A.C.		
EQUIPO: PHASOR XS	N° SERIE: 01W1PV	
ANGULO DE TRANSDUCTOR: 0°	FRECUENCIA: 2.25 MHz	TAMAÑO: 1.0"
RESPONSABLE DE CALIBRACION: ANGEL SALAZAR REYES		

LINEALIDAD HORIZONTAL		
Reflector de fondo	Ubicación de Cuadrícula	Límites Aceptables
1	25.0	25.0
2	49.0	49.0-51.0
3	74.0	73.5-76.5
4	99.0	98.0-102.0
5	125.0	123.5-127.5
6	151.0	147.0-153.0
7	175.0	171.5-178.5
8	201.0	196.0-204.0
9	225.0	220.5-229.5
10	250.0	250.0

INSPECTOR NDT	SUPERVISOR AKER SOLUTION
 <p>NDT ENGINEERING SAC Angel Hugo Salazar Reyes Nivel II, SNT TC, 1ART, UT, MT</p>	

Ultrasonic Unit Calibration Report—AWS

Ultrasonic Unit Model PHASOR XS Serial No. 01W1PV
 Search Unit—Size 1" ROUND Type Technisonic Frequency 2.25 MHz
 Calibration—Date 07-04-2010 Interval 2 Months Method AWS D1.1
 Block Serial No. 24956 Data --- As Found --- As Adjusted

SUPPLEMENTAL INSTRUCTIONS

- Start with the lowest dB level that you can obtain a 40 percent display height indication from directly over the two in section of the DS block. Add 6 dBs and record this dB reading "a" and display height "b" as the starting point on the tabulation chart.
- After recording these values in Rows "a" and "b," slide the transducer to obtain a new 40 percent display height. Without moving the transducer add 6 dBs and record the new dB reading and the new display height in the appropriate row. Repeat this step as many times as the unit allows.
- Find the average % screen values from Row "b" by disregarding the first 3 and the last 3 tabulations. Use this as %₂ in calculating the corrected reading.
- The following equation is used to calculate Row "c":
 %₁ is Row "b"
 %₂ is the average of Row "b" disregarding the first and last three tabulations.

$$dB_2 = 20 \times \log\left(\frac{\%_2}{\%_1}\right) + dB_1$$

 dB₁ is Row "a"
 dB₂ is Row "c"
- The dB Error "d" is established by subtracting Row "c" from Row "a": (a - c = d).
- The Collective dB Error "e" is established by starting with the dB Error "d" nearest to 0.0, collectively add the dB Error "d" values horizontally, placing the subtotals in Row "e."
- Moving horizontally, left and right from the Average % line, find the span in which the largest and smallest Collective dB Error figures remain at or below 2 dB. Count the number of horizontal spaces of movement, subtract one, and multiply the remainder by six. This dB value is the acceptable range of the unit.
- In order to establish the acceptable range graphically, Form M-8 should be used in conjunction with Form M-9 as follows:
 (1) Apply the collective dB Error "e" values vertically on the horizontal offset coinciding with the dB reading values "a."
 (2) Establish a curve line passing through this series of points.
 (3) Apply a 2 dB high horizontal window over this curve positioned vertically so that the longest section is completely encompassed within the 2 dB Error height.
 (4) This window length represents the acceptable dB range of the unit.

Row	Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
a	dB Reading	22.2	28.2	34.2	40.2	46.2	52.2	58.2	64.2	70.2	76.2	-	-	-
b	Display Height	80.0	81.0	79.0	81.0	79.0	80.0	79.0	79.0	79.0	80.0	-	-	-
c	Corrected Reading	22.2	29.1	34.3	40.1	46.3	52.2	58.3	64.3	70.3	76.2	-	-	-
d	dB Error	0.0	+0.1	+0.1	+0.1	+0.1	0.0	+0.1	+0.1	+0.1	0.0	-	-	-
e	Collective dB Error	0.0	0.0	+0.1	0.0	+0.1	0.0	+0.1	+0.2	+0.3	+0.3	-	-	-

Accuracy Required: Minimum allowable range is 60 . %₂ (Average) 79.67 %

Equipment is: Acceptable for Use Not Acceptable for Use Recalibration Due Date -

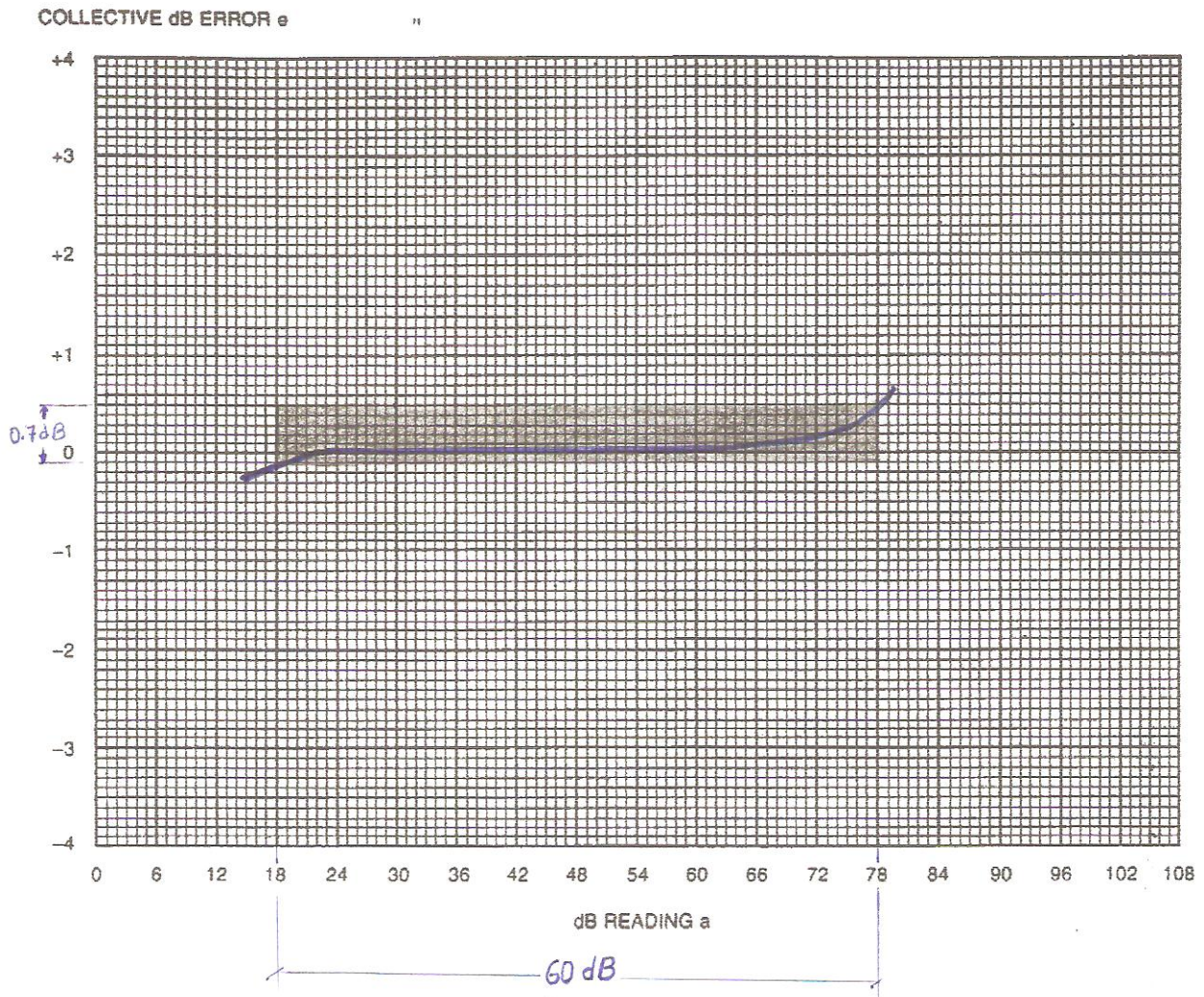
Total qualified range 22.2 dB to 76.2 dB = 54.0 dB Total error 0.3 dB (From the Chart above)

Total qualified range 18.0 dB to 78.0 dB = 60.0 dB Total error 0.7 dB (From Form M-9)

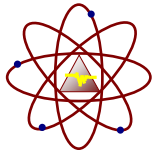
Calibrated by Angel Salazar Reyes Level II Location Lima

Form M-8

dB Accuracy Evaluation



MODELOS DE REPORTES Y PLANO



REPORTE DE ENSAYO POR ULTRASONIDO

REPORTE Nº: 200-01-UT/10

PROYECTO: EXPANSION ANTAMINA – CLIENTE AKER SOLUTION

OT - 073

PROCEDIMIENTO: NDT-AWS-UT001-10

ELEMENTO INSPECCIONADO: 073 – QS2 – 02

ZONAS INSPECCIONADAS: 02 UNIONES A TOPE ALA: J1 (073-Q2-8 J2 / 073-Q4-4 J1)

ALA: J2 (073-Q2-9 J2/ 073-Q4-1 J1)

SOLDADOR: S 507

ESPESOR: 50.0 mm

MATERIAL: ASTM A 36

PROCESO DE SOLDADURA: FCAW

EQUIPO UTILIZADO: PHASER XS 01W1PV

PATRON DE CALIBRACION: V1 (IIW)

TRANSDUCTOR ANGULAR: 71°, 60°

FRECUENCIA: 2.25 MHz

ESCALA: 500 mm

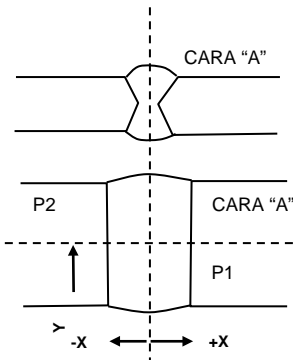
GANANCIA PRIMARIA: 51 dB

GANANCIA DE ENSAYO: 86 dB

COMENTARIOS: CONDICION DE LA JUNTAS SOLDADAS: J1 = ACEPTABLE

J 2 = ACEPTABLE

INSPECCIÓN REALIZADA POR LA CARA "A".



ITEM	NUMERO DE INDICACION	ANGULO TRANSDUCTOR	CARA DE BARRIDO	MEDIO PASO (mm)	DECIBELES				DISCONTINUIDAD				EVALUACION DE LA DISCONTINUIDAD		
					NIVEL DE INDICACION	NIVEL DE REFERENCIA	FACTOR DE ATENUACION	CLASIFICACION DE INDICACION	LONGITUD (mm.)	DISTANCIA ANGULAR (RECORRIDO DEL HAZ)	PROFUNDIDAD DESDE LA SUPERFICIE "A"	DISTANCIA (mm)			
												a		b	c
1															
2															
3															
4															

Nosotros, suscribimos y certificamos que las declaraciones en este registro son correctas y que las soldaduras fueron preparadas y ensayadas en conformidad con los requerimientos de la sección 6, parte F del código AWS D1.1 – 2008.

FECHA DEL ENSAYO: 07 de Abril del 2010

CONTRATISTA: TECNICAS METALICAS INGENIEROS

S.A.C

INSPECTOR: Angel Salazar Reyes – Nivel II SNT TC 1A

AUTORIZADO POR: ING. ANGEL ALIAGA

NDT ENGINEERING SAC

Angel Hugo Salazar Reyes
Nivel II SNT TC - 1A RT, UT, MT

REPORTE DE ENSAYO POR ULTRASONIDO

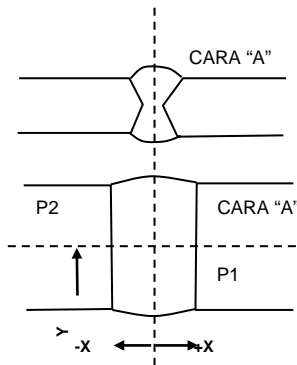
REPORTE N°: 200-01-UT/10

PROYECTO: EXPANSION ANTAMINA – CLIENTE AKER SOLUTION
OT - 073

PROCEDIMIENTO: NDT-AWS-UT001-10

ELEMENTO INSPECCIONADO: 073 – QS2 – 02

ZONAS INSPECCIONADAS: 01 UNION A TOPE ALMA J3: 73 - Q3 - 3 / 73 – Q1 - 9



SOLDADOR: S 259

ESPESOR: 38.0 mm

MATERIAL: ASTM A 36

PROCESO DE SOLDADURA: FCAW

EQUIPO UTILIZADO: PHASOR XS 01W1PV

PATRON DE CALIBRACION: V1 (IIW)

TRANSDUCTOR ANGULAR: 71°

FRECUENCIA: 2.25 MHz

ESCALA: 350 mm

GANANCIA PRIMARIA: 51 dB

GANANCIA DE ENSAYO: 76 dB

COMENTARIOS: CONDICION DE JUNTAS SOLDADAS: J 3 = ACEPTABLE

INSPECCIÓN REALIZADA POR LA CARA "A".

ITEM	NUMERO DE INDICACION	ANGULO TRANSDUCTOR	CARA DE BARRIDO	MEDIO PASO (mm)	DECIBELES				DISCONTINUIDAD					EVALUACION DE LA DISCONTINUIDAD
					NIVEL DE INDICACION	NIVEL DE REFERENCIA	FACTOR DE ATENUACION	CLASIFICACION DE INDICACION	LONGITUD (mm.)	DISTANCIA ANGULAR (RECORRIDO DEL HAZ)	PROFUNDIDAD DESDE LA SUPERFICIE "A"	DISTANCIA (mm)		
												a	b	
1	J 3 - 1	71°	A	116.72	71	51	8	+12	30	129.01	34 mm	0	+630	ACEPTABLE
2	J 3 - 2	71°	A	116.72	79	51	8	+20	30	129.17	34 mm	0	+1170	ACEPTABLE
3														
4														

Nosotros, suscribimos y certificamos que las declaraciones en este registro son correctas y que las soldaduras fueron preparadas y ensayadas en conformidad con los requerimientos de la sección 6, parte F del código AWS D1.1 – 2008.

FECHA DEL ENSAYO: 07 de Abril del 2010

CONTRATISTA: TECNICAS METALICAS INGENIEROS S.A.C

INSPECTOR: Angel Salazar Reyes – Nivel II SNT TC 1A

AUTORIZADO POR: ING. ANGEL ALIAGA

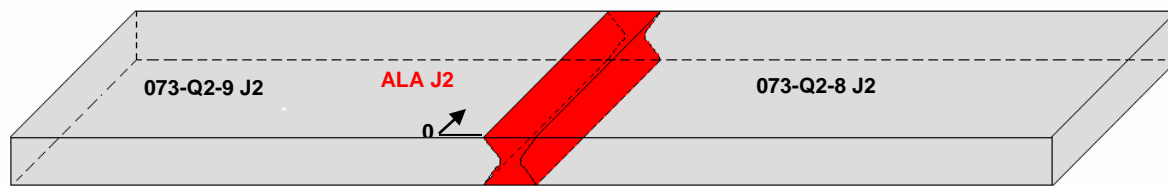
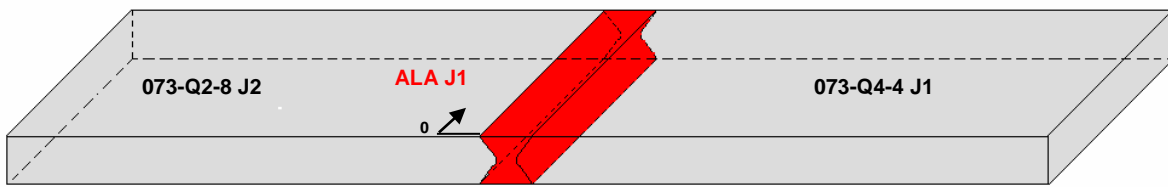
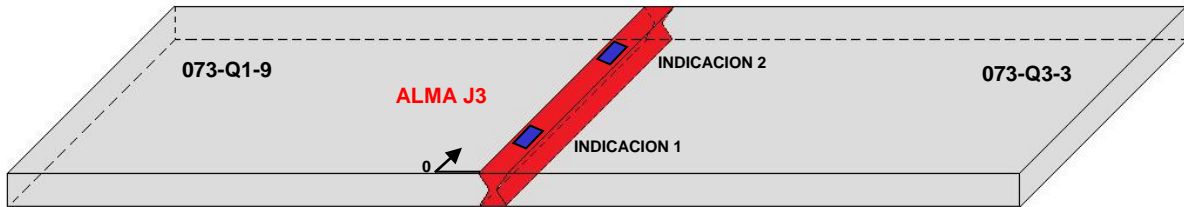
NDT ENGINEERING SAC

Angel Hugo Salazar Reyes
Nivel II SNT TC - 1A RT, UT, MT

Pág. 2 de 3

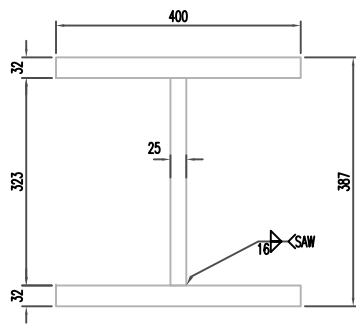
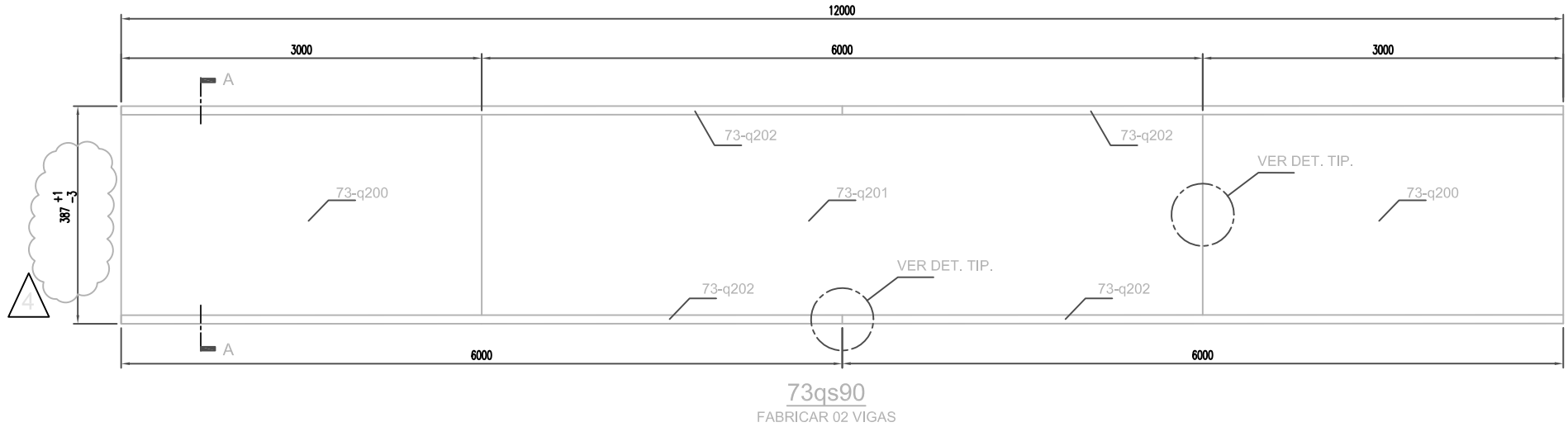
UBICACIÓN E IDENTIFICACION DE LAS ZONAS INSPECCIONADAS MEDIANTE ULTRASONIDO

073 – QS2 - 02

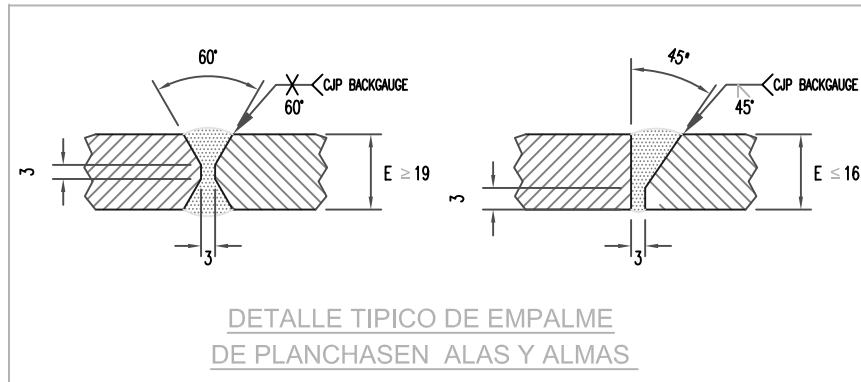


Metraje Total Inspeccionado: 2.23 m :

Zona Inspeccionada mediante Ultrasonido:



SECCION A - A
VS 387 X 400 X 32 X 25
(W 14 X 176)



DETALLE TIPICO DE EMPALME
DE PLANCHAS EN ALAS Y ALMAS

Codigo	Descripcion	Cant.	Peso (kg)	Area (m ²)	Material
73-q201	PL 25x323x6000	02	780.66	7.75	ASTM - A36
73-q202	PL 32x400x6000	08	4823.04	38.4	ASTM - A36
73-q200	PL 25x323x3000	04	760.66	7.75	ASTM - A36
TOTAL:			6344.37	53.90	

NOTAS:

- * LAS COTAS PREVALECN SOBRE EL DIBUJO Y LA LISTA DE MATERIALES
- * LAS COTAS EN PARENTESIS, SON REFERENCIALES

Rev. N°	Rev. por	Fecha	Descripción
4	J.R.G.B	15-04-10	SE ADICIONA TOLERANCIAS
3	J.R.G.B	15-04-10	SE DISMINUYE CANTIDAD
2	J.R.G.B	08-04-10	SE AUMENTA CANTIDAD
1	J.R.G.B	06-04-10	SE MODIFICA SOLDADURA
0	J.R.G.B	23-03-10	EMITIDO PARA FABRICAR

Especificaciones Técnicas

Material :	ASTM A-36
Soldadura :	
Pernos :	
Galvanizado :	
Pintura :	
Otros :	



Técnicas
Metálicas
INGENIEROS S.A.C.

Documento de Ref :

Area : INGENIERIA DE DETALLE

Plano : Habilitado

VIGA
73qs90

Dibujo : F.A.P.

Responsable: J.R.G.B

Revisado : J.R.G.B

Aprobado: J.A.H.

Escala: S/E

Fecha: 15-04-10

O.T. :

073-10

Obra : PROYECTO EXPANSION ANTIMINA

Lugar: HUARAZ

Lámina :A3

73qs90

Propietario :

ANTIMINA



Revisión :

