

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**INSPECCIÓN DE LAS UNIONES SOLDADAS DE JUNTAS A
TOPE DE PENETRACIÓN COMPLETA CON DISEÑO DE JUNTA
EN SIMPLE "V" PARA UN RANGO DE ESPEORES DE 8 A 25
MM MEDIANTE EL MÉTODO DE ENSAYO DE ULTRASONIDO Y
LA TÉCNICA DE ARREGLO DE FASES (*PHASED ARRAY*)**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller:

DANIEL LY MEDINA

ASESOR: Ing. Daniel Merino Ponce

Lima, Junio de 2015

RESUMEN

A través de los años ha existido la necesidad del hombre de poder unir elementos o componentes entre sí, de todos los procesos existentes el más utilizado y efectivo en el mundo es el de soldadura; sin embargo, este proceso debe pasar por un control de calidad y así asegurar su funcionabilidad y duración en el tiempo. Existen diversos métodos para certificar que la soldadura realizada es correcta, para ello se hace uso de los ensayos no destructivos; ya que nos permiten inspeccionar la soldadura y asegurar que fue realizada de forma adecuada sin afectar a la misma ni física ni químicamente. Si bien existen ensayos volumétricos tradicionales como el ultrasonido convencional y la radiografía industrial, la búsqueda en la optimización de los tiempos de inspección ha generado un método de ultrasonido avanzado (ultrasonido de arreglo de fases – *Phased Array*); el cual se describirá en el siguiente trabajo. Es por ello que en el presente trabajo se busca poder validar a través de la información de los códigos al ultrasonido de arreglo de fases como el método más eficaz para la inspección volumétrica de uniones soldadas de junta a tope en forma de “V” con penetración completa para un rango de espesores entre 8 a 25 mm. Para ello se utilizarán 8 probetas calificadas, las cuales serán ensayadas mediante el método de ultrasonido *Phased Array* y radiografía industrial convencional para su comparación. En esta tesis se ha podido comprobar que la técnica de ultrasonido *Phased Array* es una alternativa viable para la inspección de juntas a tope con diseño en simple “V” para el rango de espesores ensayado. Asimismo se desarrolló un procedimiento final de inspección mediante ultrasonido *Phased Array* y su aplicación en uniones soldadas con juntas a tope en forma de simple “V”, para un rango de espesores entre 8 a 25 mm. Pudiéndose realizar nuevamente estos ensayos, así como también utilizarlo para su aplicación en la fabricación de piezas y componentes



DEDICATORIA

Agradezco a mi madre por todo el esfuerzo y total desprendimiento, por permitirme esta carrera.

A mi padre y hermanos por el apoyo que me brindaron durante toda mi carrera.

A Evelyn por el apoyo que me dio en el último año de carrera.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo y motivación las personas que estuvieron a mí alrededor.

Al Ing. Daniel Merino Ponce por darme la guía para realizar un buen trabajo.

A mi amigo, Alvaro Reyna Barandiarán por las facilidades que me brindó en la realización de los ensayos.



INDICE

INTRODUCCIÓN	1
1.INTRODUCCIÓN A LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END).....	3
1.1. Radiografía Industrial.....	4
1.1.1 Conceptos Básicos.....	5
1.1.2 Técnicas Radiográficas.....	6
1.1.3 Proceso de obtención de una placa radiográfica.....	16
1.1.4. Cálculos de Exposición y Procesamiento.....	18
1.1.5 Selección de la Película Adecuada.....	20
1.1.6. Seguridad Radiológica.....	21
1.2. Ultrasonido Convencional.....	22
1.2.1 Introducción.....	22
1.2.2 Haz del Ultrasonido.....	25
1.2.3 Modo de recorrido de la Onda ultrasónica.....	27
1.2.4 Tipos de Onda Ultrasónica.....	28
1.2.5 Sistemas básicos de transmisión ultrasónica.....	33
1.2.6 Equipo Básico de Ultrasonido Convencional.....	35
1.3. Ultrasonido <i>Phased Array</i> (UTPA).....	38
1.3.1 Conceptos Básicos.....	43
1.3.2 Principios de Funcionamiento.....	47
1.3.3. Equipamiento.....	56
1.3.4. Procedimiento de Inspección.....	60
2. ENSAYO DE PROBETAS MEDIANTE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL Y ULTRASONIDO DE ARREGLO DE FASES.....	63
2.1. Ensayo de Ultrasonido de Arreglo de Fases.....	63
2.1.1. Metodología de Ensayo.....	64
2.2. Equipamiento a utilizar para el ensayo.....	65
2.2.1. Calibración del Equipo.....	68
2.2.2. Calibración de Velocidad.....	69
2.2.3. Calibración del Retardo de la Zapata (Wedge Delay).....	70

2.2.4. Calibración de Sensibilidad.....	71
2.2.5. Ensayo de Probeta 1	72
3.RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYO DE PROBETAS MEDIANTE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL Y ULTRASONIDO DE ARREGLO DE FASES.....	74
3.1.- Resultados del Ensayo de las Probetas	74
3.1.1. Probeta 1 (Código N°1)	75
3.1.2. Probeta 2 (Código N°2)	76
3.1.3. Probeta 3 (Código N°5)	77
3.1.4. Probeta 4 (Código N°6)	78
3.1.5. Probeta 5 (Código N°7)	80
3.1.6. Probeta 6 (Código N°8)	81
3.1.7. Probeta 7 (Código N°11)	82
3.1.8. Probeta 8 (Código N° 13)	84
3.2.- Conclusiones del Ensayo	89
4. PROCEDIMIENTO FINAL DE INSPECCIÓN MEDIANTE ULTRASONIDO DE ARREGLO DE FASES	90
CONCLUSIONES	99
RECOMENDACIONES	100

INTRODUCCIÓN

La soldadura es un proceso de fabricación que se ha utilizado durante mucho tiempo en el mundo, si bien la soldadura es muy efectiva, puede acarrear problemas si es que esta no es realizada de forma adecuada; ya sea por una incorrecta aplicación del procedimiento de soldeo, por una inadecuada aplicación del soldador, etc. Es por ello que muchas veces se exige que la soldadura sea sometida a un control de calidad; es decir, inspeccionada mediante algún tipo de ensayo no destructivo como radiografía industrial o ultrasonido industrial, que certifique que se encuentre libre de defectos, de tal manera que cumpla su función en el tiempo y no sea motivo de accidentes en el futuro.

Si bien existen otros métodos de ensayo no destructivo, actualmente en Perú se aplican principalmente dos para el análisis volumétrico de la soldadura: Radiografía Industrial convencional y ultrasonido Industrial. La radiografía industrial se ha utilizado durante años; sin embargo, es bien sabido que este método debe ser aplicado bajo ciertos parámetros y condiciones de seguridad (ocupacional y ambiental), debido a la radiación que se emite durante la realización de este ensayo; asimismo, la radiografía industrial convencional no nos proporciona resultados inmediatos, debido a los procesos siguientes que se llevan a cabo para la obtención de las placas radiográficas finales; por el contrario, el ensayo de ultrasonido no pone en riesgo la vida del operador ni la de personas adyacentes al área de trabajo y nos entrega resultados en tiempo real sin la necesidad de tener que esperar por ellos.

Es por ello que en el presente trabajo se plantea que el control de calidad en las uniones soldadas de juntas a tope en forma de “V” se lleve a cabo mediante el método no destructivo de ultrasonido avanzado mediante la técnica de arreglo de fases (*Phased Array*), el cual se basa en la emisión de ondas mecánicas a frecuencias muy altas (mayores a 20 kHz) que causan vibraciones en el material y que nos permitirá la detección de discontinuidades basándonos en el principio de emisión y recepción de energía; si bien posee el mismo principio que el ultrasonido convencional, se diferencian básicamente en que el ultrasonido *Phased Array* posee múltiples elementos y que puede ser controlado electrónicamente para la mejora en la detección de discontinuidades según sea el caso. Así, evitaremos el riesgo

latente que el método de Radiografía Industrial conlleva; el cual es la exposición del personal inspector a la radiación. Así también, se incrementa la precisión en la detección, medición, localización y orientación de defectos críticos, tales como: falta de fusión, falta de penetración, poros, fisuras, etc., independientemente de su orientación.

El objetivo principal de este trabajo es validar a través de la información de los códigos el uso del ultrasonido – *Phased Array* como el método más eficaz para la inspección de las uniones soldadas con junta a tope en forma de “V” para rangos entre 8 y 25 mm de espesor presentes en diversas estructuras como puentes, tuberías de presión de hidroeléctricas, etc.

Los objetivos específicos son describir y comparar los métodos de ultrasonido-*Phased Array*, ultrasonido convencional y radiografía industrial, sus alcances y limitaciones de acuerdo a los estándares de inspección mencionados en los códigos; además verificar que el nivel de confiabilidad del ultrasonido *Phased Array* es como mínimo igual al de radiografía industrial; para ello se hará uso de 10 probetas calificadas con defectos conocidos y finalmente obtener un procedimiento de inspección final para uniones soldadas de junta a tope en forma de “V” para un rango de espesores entre 8 y 25 mm.

En el primer capítulo, se hará una descripción general de los ensayos de radiografía industrial, ultrasonido convencional y ultrasonido de arreglo de fases; en el segundo capítulo se explica los principios de funcionamiento y todo lo referente al ultrasonido de arreglo de fases. En el tercer y cuarto capítulo se exponen los ensayos realizados y los resultados obtenidos. Por último en el quinto capítulo se describe el procedimiento final de inspección según el código ASME para la inspección de uniones soldadas.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN A LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

Los ensayos no destructivos surgen como una necesidad de poder asegurar la funcionalidad y confiabilidad de los componentes de tal forma que estos se encuentren dentro de los límites de diseño; es por ello que a los ensayos no destructivos se le conoce a las pruebas realizadas a materiales las cuales no afectan de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de tal forma que no repercuten en su utilidad futura. Los ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, capilaridad, absorción, etc.

Las principales aplicaciones de los END son:

Defectología: Detección y evaluación de discontinuidades superficiales o sub-superficiales.

Caracterización de materiales: Evaluación de las características mecánicas, estructurales y propiedades físicas de los materiales.

Metrología: Se utiliza en el control dimensional, se aplica para la medición de espesores, recubrimientos, etc.

Métodos y técnicas

- AET – Emisión acústica
- ET – Electromagnetismo
- LT – Fuga
- PT – Líquidos Penetrantes
- MT – Partículas Magnéticas
- NRT – Radiografía neutrónica
- RT – Radiografía Industrial
- IRT - Térmico/Infrarrojo

- UT – Ultrasonido
- VA – Análisis de Vibración
- VT – Visual
- Láser
- MFL – Magnetic Flux Leakage

1.1. Radiografía Industrial

Es un método no destructivo, el cual que consiste en la absorción diferenciada de radiación por la pieza que se va a inspeccionar, con el fin de examinar volumétricamente un componente, y así detectar la presencia de discontinuidades internas.

Como se indicó este método consiste en la absorción diferenciada de radiación (rayos X o gamma) por los materiales a inspeccionar; así como, también la sensibilización de placas radiográficas debido a estas radiaciones, de tal forma que en la placa quede reflejado el interior del componente, como una proyección de la misma (ver figura 1.1).

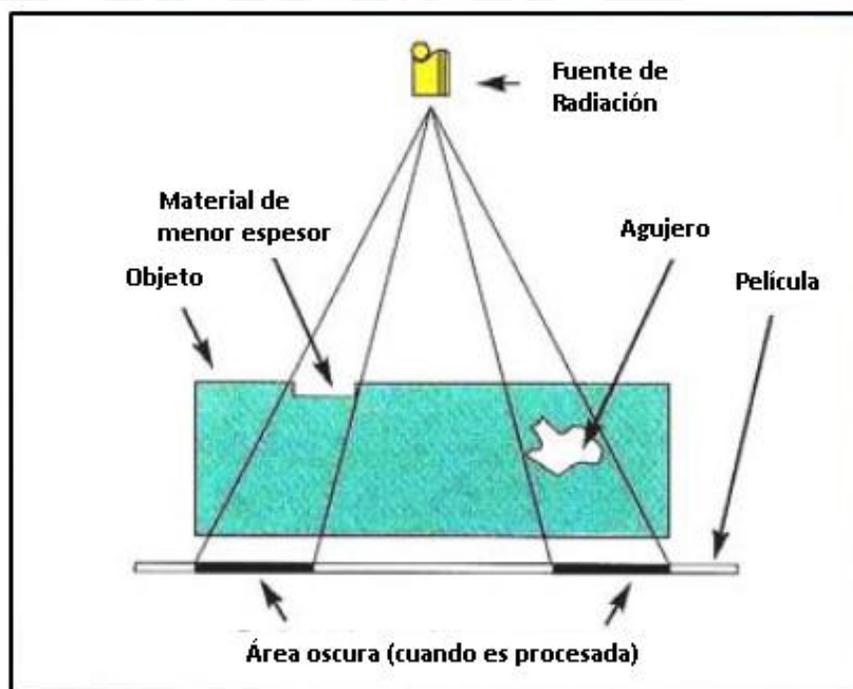


Figura 1.1 - Proyección del componente en una placa radiográfica

Ventajas de la radiografía industrial

- Se puede aplicar para diferentes tipos de materiales
- Es aplicable a un rango amplio de espesores
- Se obtiene un registro permanente de la inspección
- Es un ensayo muy sensible a los cambios de densidad que puedan presentarse en la pieza de inspección, facilitando así la detección de las discontinuidades.
- Presenta un costo reducido en el caso de los rayos gamma.
- Es aplicable para la detección de errores de ensamble o montaje.

Limitaciones de la Radiografía Industrial

- No es recomendable en elementos de geometría compleja, ya que son difíciles de inspeccionar.
- Se requiere cumplir con rigurosas medidas de seguridad, ya que la radiación es dañina para el personal.
- Requiere de Instalaciones especiales para poder realizar el revelado de las películas radiográficas para su posterior análisis.
- Se requiere de acceso a las 2 caras del componente a inspeccionar (lados opuestos).
- No indica la profundidad de la discontinuidad.
- No detecta discontinuidades de tipo laminar.

1.1.1 Conceptos Básicos

Radioactividad: Se le conoce a la radioactividad a la desintegración espontánea de los núcleos de ciertos elementos (Isótopos radioactivos), acompañada de la emisión de radiación electromagnética y partículas con características radioactivas.

Radiación: Es el flujo de ondas electromagnéticas que se propagan a través del espacio, que viajan a la velocidad de la luz (300 000 km/s), no poseen masa, no poseen carga y son capaces de penetrar elementos muy densos tales como el acero.

En el caso de la radiografía industrial, se utilizan principalmente 2 tipos de radiación: rayos X y rayos gamma (γ), los cuales poseen las siguientes características en común:

- Son ondas electromagnéticas
- No poseen masa ni carga
- Son invisibles
- El viaje que realizan es en línea recta
- Tienen la particularidad que penetran la materia y este poder depende de la energía que posean
- Destruyen las células vivas

1.1.2 Técnicas Radiográficas

A) 1.1.2.1 Rayos X

Son ondas electromagnéticas que poseen la misma naturaleza que la radiación luminosa, pero estas poseen una frecuencia y energía mucho mayor. En la figura 1.2 podemos apreciar el espectro electromagnético de acuerdo a la longitud de ondas de los diferentes tipos de onda.

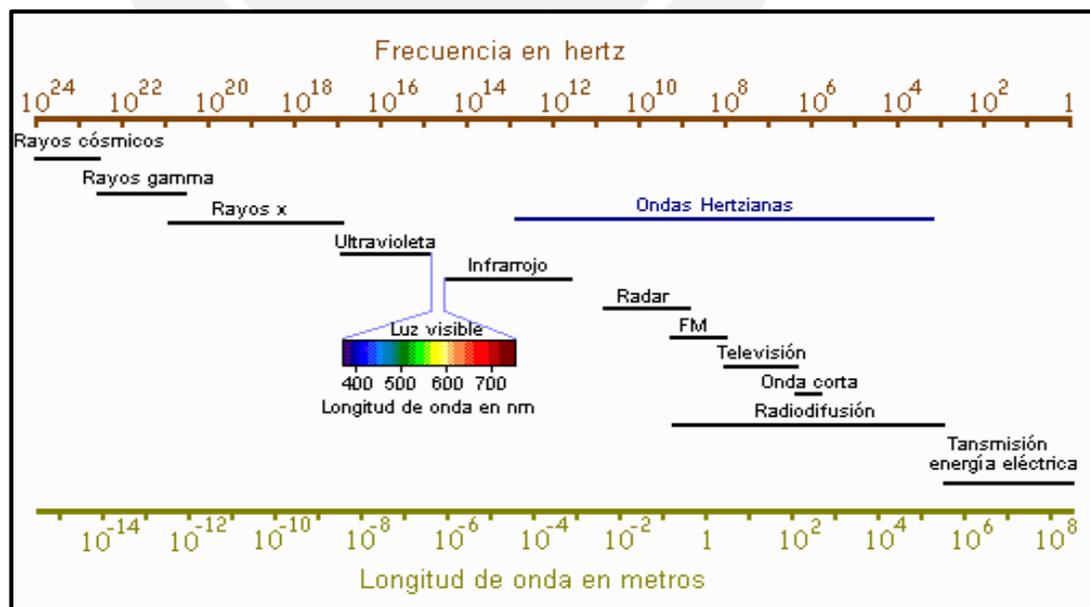


Figura 1.2 - Espectro Electromagnético

Los rayos X se generan por la excitación de electrones de un átomo, mediante el bombardeo de electrones acelerados; poseen la característica de viajar a la velocidad de la luz y que no pueden ser desviados por campos magnéticos o electromagnéticos, es por ello que su trayectoria siempre describe una línea recta. Estos rayos atraviesan los materiales, donde son absorbidos o sufren una pérdida de energía dependiendo de las densidades de los materiales atravesados, para finalmente poder sensibilizar las emulsiones radiográficas que se encuentran en las películas, donde se generará la proyección de algún componente inspeccionado.

Generación de Rayos X

Los rayos X son producidos por la brusca desaceleración que sufren los electrones al impactarse contra un blanco o ánodo. Luego de este impacto el 99% de la energía es disipada en forma de calor y solo el 1% es convertido en radiación X. En la figura 1.3 se puede apreciar como los electrones viajan del ánodo al cátodo y son impactados contra un objetivo y así generar la radiación tipo X.

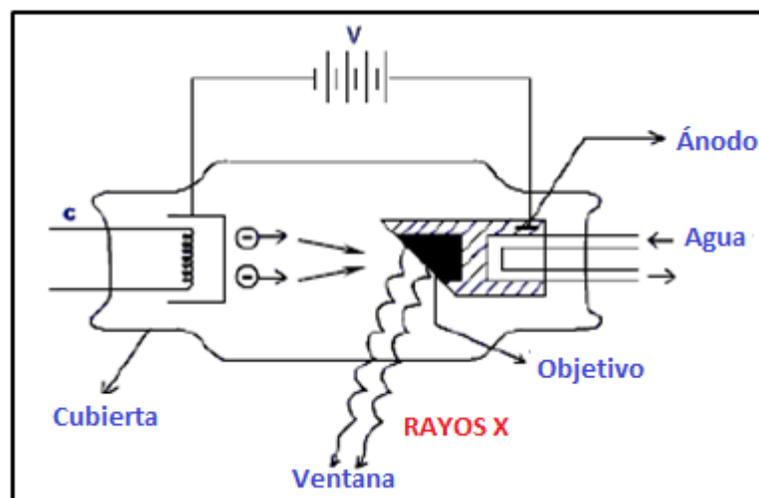


Figura 1.3 - Generación de rayos X

Normalmente los tubos de rayos X cuentan con un filamento que es calentado hasta la incandescencia, este es el encargado de suministrar los electrones y forma el cátodo o

electrodo negativo del tubo. El cátodo normalmente contiene una pastilla de tungsteno incrustada en una masa de cobre, la cual tiene la función de disipar el calor que se genera luego de la emisión de electrones del cátodo al ánodo.

La aceleración de los electrones se produce debido al alto voltaje (kilovoltios) que se genera entre el cátodo y el ánodo, empujando de esta forma a los electrones a altísimas velocidades (300 000km/s) desde el cátodo hasta el blanco (ánodo). La rápida interacción de los electrones con el blanco, permite la generación de los rayos X de distintas longitudes de onda.

Cátodo

Consiste en un filamento de wolframio en forma de espiral, el cual es calentado por una corriente que es suministrada por un transformador de bajo voltaje y alto amperaje. La temperatura del filamento será controlada mediante un reóstato que forma parte del circuito, ya que nos permitirá controlar la corriente que pasará por el filamento. Si bien el filamento se encuentra dentro de la estructura del cátodo, se ubica exactamente dentro de la copa focalizadora, la cual tiene como función concentrar el haz de electrones hacia una pequeña área del blanco en el ánodo que se conoce como punto focal (ver figura 1.4). Como se sabe si existe un flujo de electrones es que existe una corriente eléctrica, es por ello que al flujo de electrones que se desplaza del cátodo al ánodo se le conoce como corriente del tubo y se mide el orden de los miliamperios. Al permanecer otras variables constantes se puede afirmar que la cantidad de rayos X es directamente proporcional a la corriente del tubo.

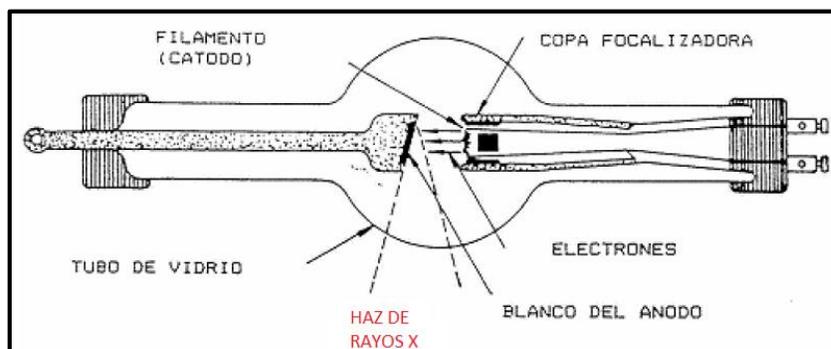


Figura 1.4 - Tubo de Rayos X

Ánodo o Anticátodo

El material comúnmente usado para este componente es el tungsteno, debido a su alto punto de fusión; aunque existen casos especiales donde se utilizan otros materiales.

Otra ventaja que posee el tungsteno es que posee un número atómico alto (74), esto incrementa la eficiencia de producción de rayos X, ya que estos dos parámetros son proporcionales.

Si bien el tungsteno posee la característica de tener alto punto de fusión, como ya se dijo el 99% de la energía transmitida se disipa en forma de calor y solo el 1% genera los rayos X, es por esto que es necesario que el ánodo se refrigere (ver figura 1.5). Por esto, el ánodo está hecho en cobre lo que permite que se disipe el calor de mejor manera; asimismo, puede haber casos que se tengan cobres huecos, por los que se hace circular agua o aceite para facilitar el enfriamiento del ánodo o también se utilizan aletas para la transferencia de calor.

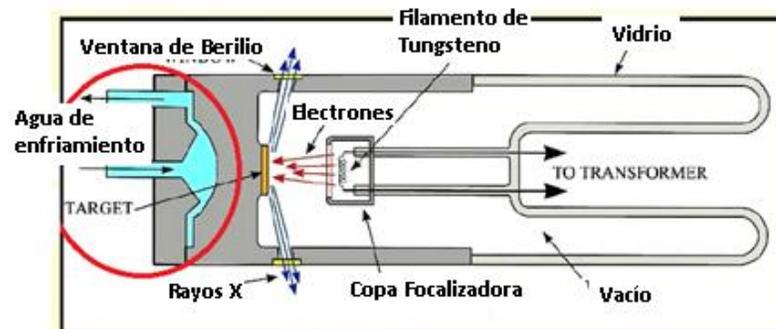


Figura 1.5 - Sección Transversal Esquemática de un Tubo de Rayos X - Refrigeración con agua

La radiación de un tubo de rayos X puede hacerse de forma direccionada, utilizando un tubo de rayos X, que ve limitada la radiación de acuerdo al diseño de la puerta del tubo de la carcasa; así también, puede hacerse de forma panorámica (radiación emitida en 360°), y se utilizan para las radiografías llamadas radiografías de exposición panorámicas (ver figura 1.6), en este caso el blanco del ánodo es de forma cónica y el haz de electrones impacta directamente sobre la punta del cono, consiguiendo así la ortogonalidad del haz de radiación y emitiendo rayos X en 360°.

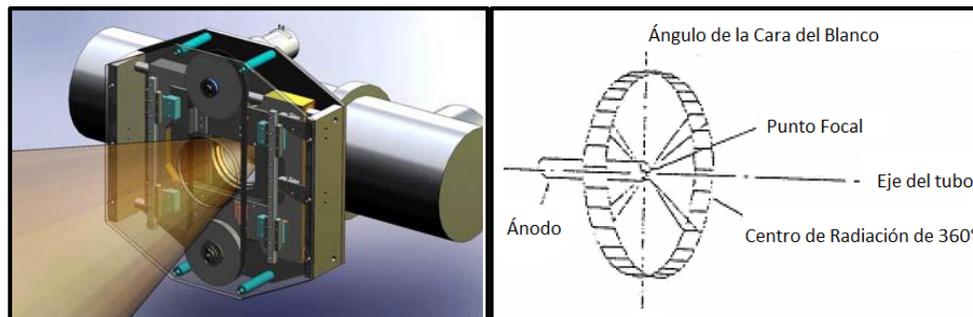


Figura 1.6 - Forma de radiación direccional (izquierda) y panorámica (derecha)

Tubos de Rayos X

Los tubos de rayos X se fabrican en diferentes formas, tamaños y materiales, la selección depende del producto o componente que se requiere inspeccionar o del uso que el tubo de rayos X tendrá. La envoltura de rayos X puede ser de metal, cerámica o vidrio. Este material absorbe la mayor parte de los rayos X emitidos y se le conoce como filtración inherente del tubo de rayos X.

Así también los generadores de rayos X pueden ser obtenidos de acuerdo a la energía de salida. Una clasificación aproximada según el kilo voltaje es:

Tabla 1.1 - Clasificación de tubos de Rayos X

De Bajo Voltaje	Entre 5 kV y 50 kV
De mediano Voltaje	Entre 50 kV y 300 kV
De Alto Voltaje	Entre 300 kV y 1000 kV
De Súper Voltaje	De 1 MV a 30 MV

B) 1.1.2.2 Rayos Gamma (γ)

Son de la misma naturaleza que los rayos X; sin embargo, poseen un rango de energía más estrecho (ver figura 1.7). El origen de rayos X es electrónico; por otro lado, el origen de rayos gamma es debido a la desintegración nuclear de sustancias radioactivas.

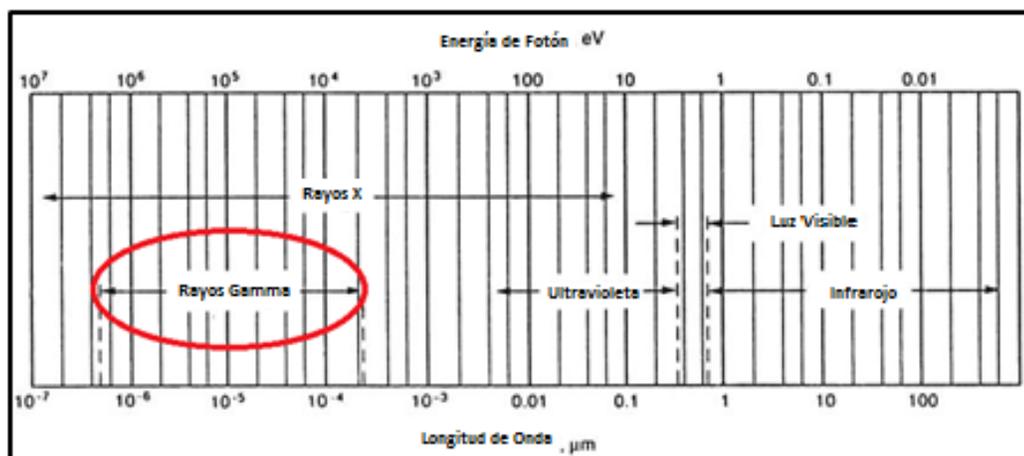


Figura 1.7 - Rango de energía – Rayos gamma

Algunos isótopos radioactivos se encuentran en estado natural; sin embargo, existen otros, a los que se les conoce como isótopos artificiales, ya que son producidos artificialmente como es el caso del Cobalto 60 o Iridio 192. La forma de obtener estos radioisótopos son bombardeando estos elementos con neutrones.

Generación de rayos gamma

La radiación gamma se obtiene gracias a la desintegración de un isótopo radioactivo o también llamado radioisótopos. Los radioisótopos se les conocen a aquellos átomos que pueden tener más o menos neutrones que los que poseen los núcleos del isótopo estable. Por ello los radioisótopos son inestables y se desintegran emitiendo radiaciones de diferentes tipos, dentro de ellas la radiación γ , así como partículas α y β . A este proceso de desintegración se le conoce como decaimiento radioactivo (ver figura 1.8).

Intensidad de la Radiación

La intensidad de radiación está estrictamente ligada al material radioactivo que se esté utilizando, y está relacionada con el número de átomos que se desintegran en un segundo (velocidad de radiación). La unidad de medida de la radioactividad es el Bequerelio (Bq),

aunque antiguamente era el Curie (Ci). 1 Ci corresponde al nivel de radioactividad y es igual a la desintegración de $3,7 \times 10^9$ átomos por segundo.

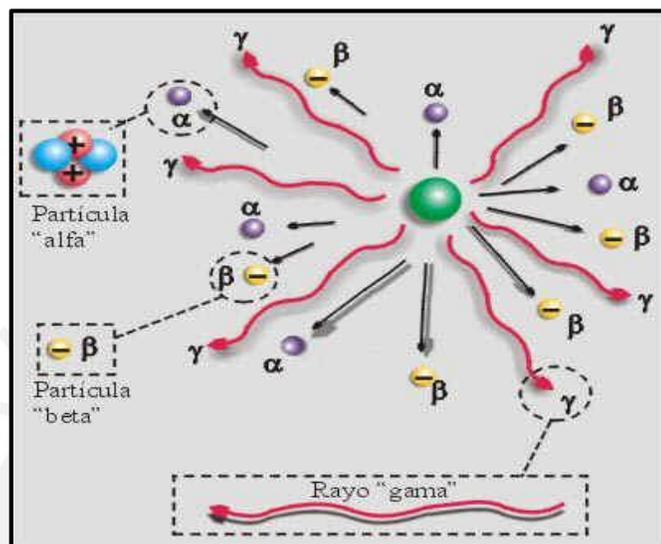


Figura 1.8 Emisión de rayos γ , partículas α y β por un radioisótopo

Actividad Específica

Es la actividad de una fuente medida en Curies o en Bequerelios por gramo o por centímetro cúbico, simplemente nos define el grado de concentración que posee el material radioactivo.

Vida Media

Debido a que la radiación γ es la desintegración de átomos en el tiempo, esta no puede ser graduada ni es constante en el tiempo. Es por ello que la radiación γ sufre un decaimiento de su nivel de radioactividad, este decaimiento depende particularmente del material.

Es por ello que se define el concepto de vida media, el cual nos indica el tiempo requerido para que la fuente de radiación decaiga su nivel de radioactividad a la mitad.

En la siguiente tabla se muestra el tiempo de vida media de algunos materiales:

Tabla 2 - Vida media de algunos materiales radioactivos

	Iridio 192	Cobalto 60	Cesio 137	Tulio 170	Radio 226
Vida Media	75 días	5.3 años	30 años	130 días	1620 años

Construcción

Una fuente de radiación γ posee en su interior miligramos de material radioactivo, el cual tiene forma de pastilla y se encuentra en una cápsula de acero, esta cápsula se encarga de retener y proteger a esta pastilla; asimismo las regulaciones establecen que las fuentes se depositan en cámaras hechas de plomo, uranio u otro material protector (ver figura 1.9).

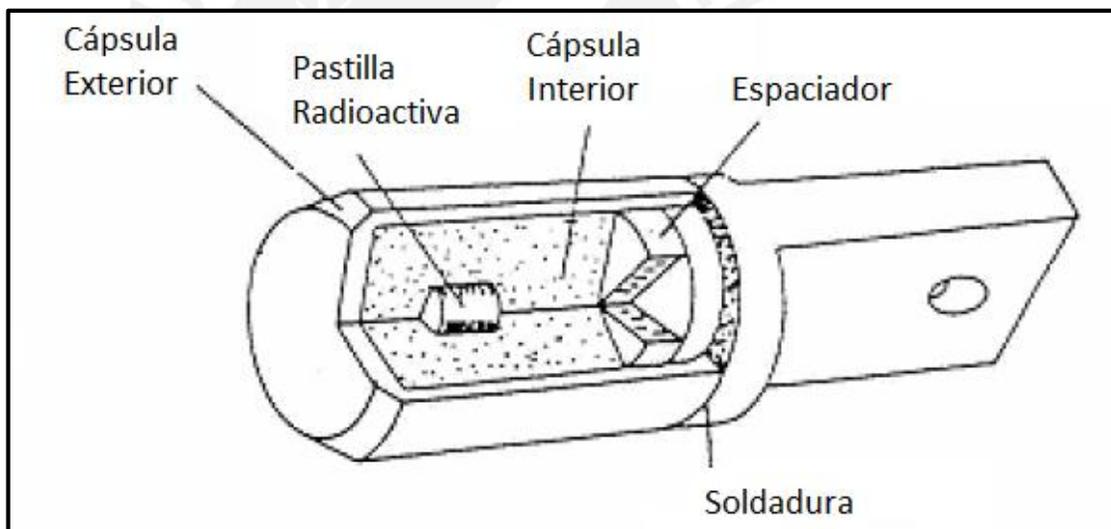


Figura 1.9 - Cápsula contenedora del material radioactivo

Absorción de la Radiación

Cuando un haz de radiación incide sobre un material, la energía va disminuyendo (sufre una atenuación) conforme atraviesa el espesor del material. Esta radiación interactúa con el material de tres formas o procesos: El efecto Fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares (ver figura 1.10)

Efecto Fotoeléctrico

Sucede cuando un fotón X o γ penetra la materia y mediante un choque elástico le transmite toda su energía a un electrón, el cual es arrancado de su órbita y puesto en movimiento.

Efecto Compton

Ocurre cuando un fotón penetra en la materia y que luego del choque cede parte de su energía, resultando una partícula en movimiento y un fotón secundario de menor energía y distinta dirección (radiación dispersa).

Producción de Pares

Ocurre cuando un fotón incidente pasa cerca del núcleo del átomo y tiene como resultado la conversión en dos partículas distintas: Un electrón y un positrón

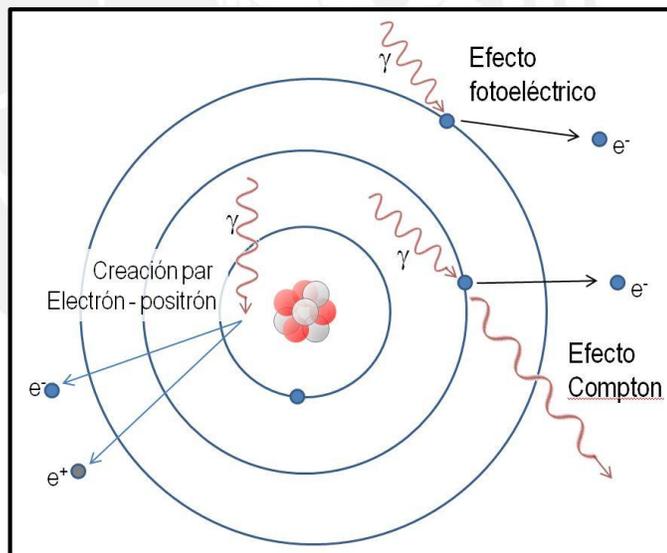


Figura 1.10 - Efecto Fotoeléctrico, Efecto Compton y Producción en Pares

La probabilidad de que suceda cualquiera de estos 3 procesos dependerá de la energía de la radiación incidente (Mev) y del número atómico (Z) que presente el material que ha sido irradiado (ver figura 1.11).

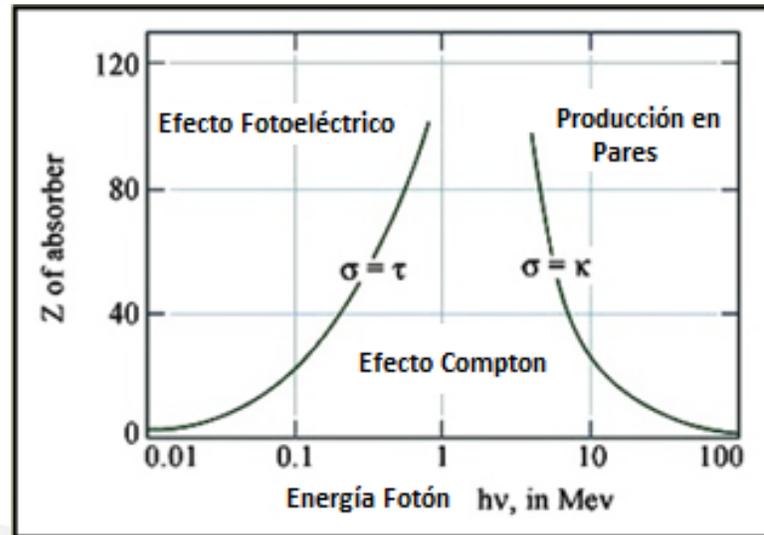


Figura 1.11 - Probabilidad de que suceda cualquiera de los 3 efectos, de acuerdo a su Energía y su número atómico

Dispersión de la radiación

A) Dispersión Interna

Es originada por la interacción del haz incidente con el material a radiografiar, tiene una dirección distinta a la dirección del eje inicial de incidencia, es una característica a tomarse en cuenta para obtener buenos resultados en la radiografía. (Ver figura 1.12)

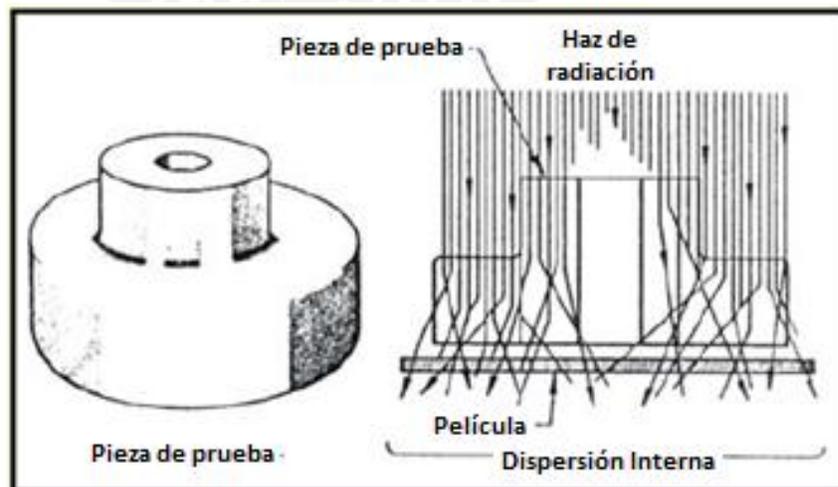


Figura 1.12 - Representación de la Dispersión Interna

B) Dispersión Externa

Es producida en las paredes u objetos vecinos al espécimen, causan el ingreso de rayos por otros lados del espécimen, puede llegar a oscurecer la placa radiográfica y causar efectos indeseables en ella. (Ver figura 1.13)

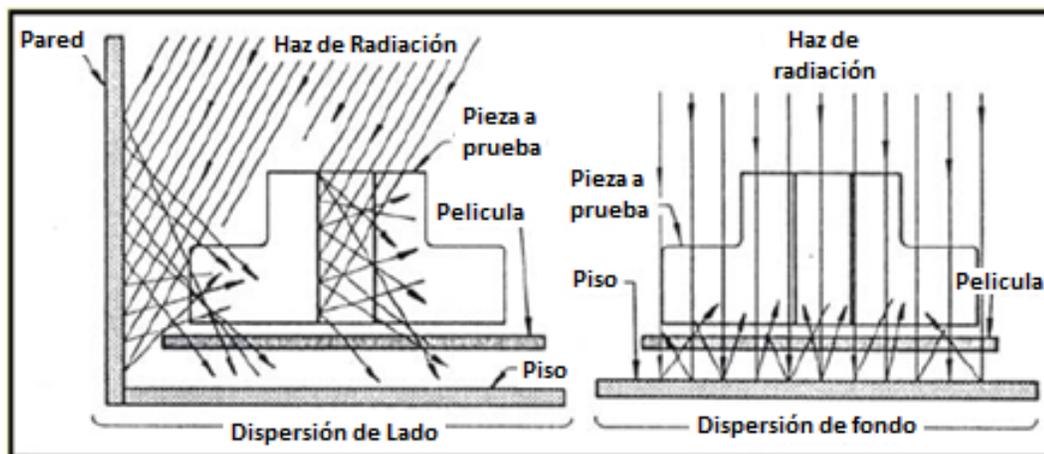


Figura 1.13 - Representación de la Dispersión Externa

Ventajas de rayos γ frente a rayos X

La emisión por rayos γ presenta algunas ventajas frente a la emisión por rayos X:

- Simplicidad en los equipos
- Fuentes de radiación de bajo peso
- No se requiere de una fuente de voltaje, ya que siempre se está emitiendo radiación
- Son portables

Estas ventajas son ideales cuando el radiografiado se hace en espacios de difícil acceso o en lugares apartados donde no se cuenta con energía eléctrica.

1.1.3 Proceso de obtención de una placa radiográfica

Una placa radiográfica es una hoja de aproximadamente 0.18 mm de espesor de plástico y transparente, cubierta por ambos lados con una emulsión de granos de bromuro de plata de

aproximadamente un espesor de 0.25 mm; asimismo las superficies externas están cubiertas por una capa de gelatina que se encarga de proteger la emulsión de posibles daños mecánicos.

El proceso para que se fije la imagen empieza cuando la radiación incide sobre los granos de bromuro, los cuales quedan sensibilizados, produciendo una imagen permanente.

A continuación se realiza el Revelado, el cual utiliza un producto químico (revelador) y permite que los granos de bromuro que han sido sensibilizados sean reducidos a partículas negras. Posterior a ello se produce el Fijado, el cual consta de otro producto químico (Fijador – ver figura 1.14) que se encarga de eliminar aquellos granos que no han sido sensibilizados de tal forma que estos no sean sensibilizados por la luz y ayuda al endurecimiento de la suspensión. Finalmente se procede el lavado y Secado, utilizados para eliminar los agentes químicos usados anteriormente y terminar de endurecer la suspensión; así como, proteger la placa de posibles ralladuras.



Figura 1.14 - Productos químicos utilizados para el revelado y el fijado de placas radiográficas

Finalmente se obtendrán imágenes con diferentes densidades que van desde un negro denso hasta un blanco transparente que podrán ser analizadas con la ayuda de un negatoscopio, que es un dispositivo que permite ver radiografías a través de un sistema de iluminación por transparencia (ver figura 1.15).



Figura 1.15 - Análisis de una placa radiográfica con ayuda de un Negatoscopio

1.1.4. Cálculos de Exposición y Procesamiento

Existen 3 elementos básicos que podemos destacar a la hora de la realización de un ensayo por radiografía sin importar si se usa rayos X o rayos γ (ver figura 1.16). Esos 3 elementos son:

- Fuente de radiación
- Pieza o componente a radiografiar
- Película radiográfica

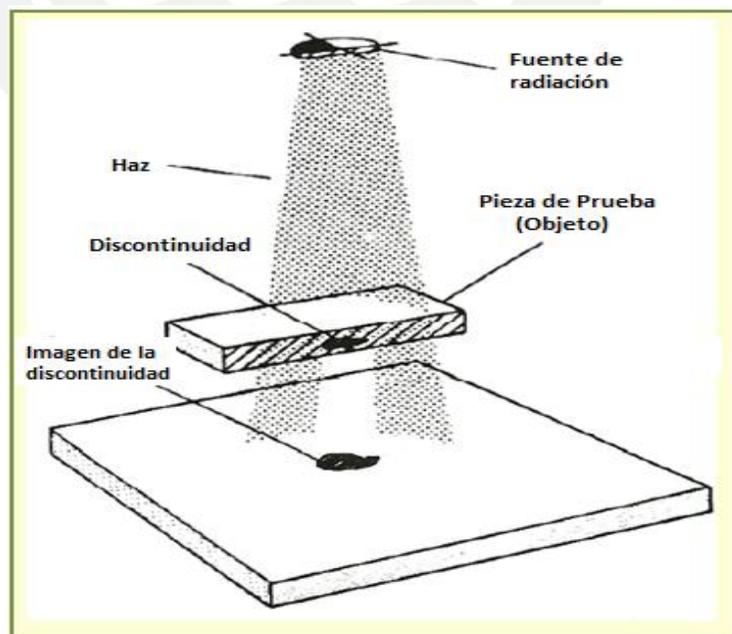


Figura 1.16 - Esquema Básico de la Radiografía Industrial

Principio Geométrico de las Exposiciones

A partir de la figura 1.17 podemos ver como la imagen sufre agrandamientos o deformaciones, debido a la proyección del objeto; asimismo podemos notar como varía la calidad de la imagen radiográfica al variar la distancia entre la fuente y la película (Distancia Fuente-Película).

Penumbra Geométrica

Es la falta de definición causada tanto por el foco, la distancia del foco al objeto y la distancia del objeto a la película (ver figura 1.17 y 1.18).

$$Ug = \frac{F * t}{d_0} \dots \dots \dots (1.1)$$

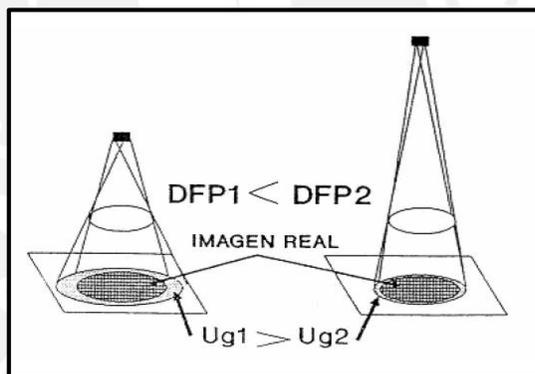


Figura 1.17 - Variación de la Distancia Foco-Película modificando la Penumbra Geométrica (Ug).

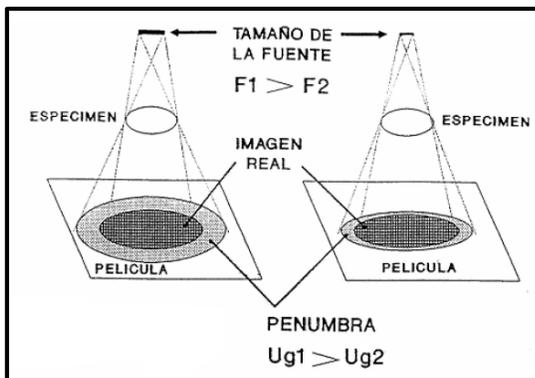


Figura 1.18 - Variación de la Imagen radiográfica por Efecto del Tamaño de Fuente de radiación

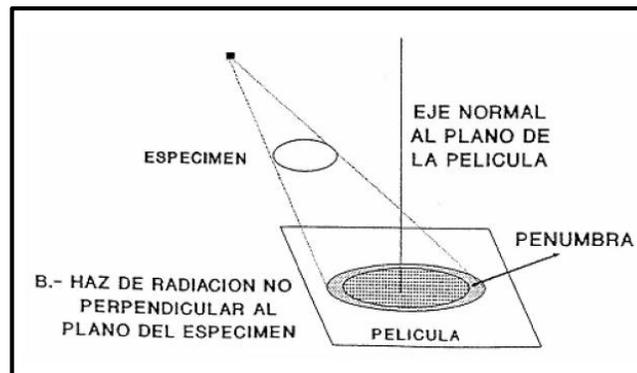


Figura 1.19 - Variación de la Imagen radiográfica por efecto del ángulo de incidencia de radiación sobre el espécimen

Para disminuir estos factores geométricos sobre la imagen que se logra en la placa radiográfica, se pueden tomar las siguientes consideraciones:

- La Distancia foco-película debe ser la mayor posible
- Se debe procurar que el objeto y la película se encuentren lo más cerca posible
- La fuente de radiación tiene q ser lo más puntual posible.
- La radiación debe ser direccionada de forma perpendicular hacia la película
- Se debe procurar que el plano del objeto a radiografiar y el plano de la película sean paralelos.

1.1.5 Selección de la Película Adecuada

La selección de la película está determinada por el nivel de contraste y definición que se requieran.

Densidad: Es el grado de ennegrecimiento de una placa radiográfica, cuanto mayor densidad tenga más negra estará esta, nos ayuda a estimar la cantidad de radiación recibida por cada una de las zonas.

Contraste: Es la diferencia de densidad entre dos zonas adyacentes en una placa radiográfica, sino se tiene buen contraste será más difícil poder notar la diferencia de densidades.

Definición: Queda definida como el ancho de penumbra a la cual se tiene un cambio de densidades, si se tiene menor ancho de penumbra se tiene una mayor definición

Calidad radiográfica: Es determinada por la definición y el contraste obtenidos en la toma radiográfica (ver figura 1.20).

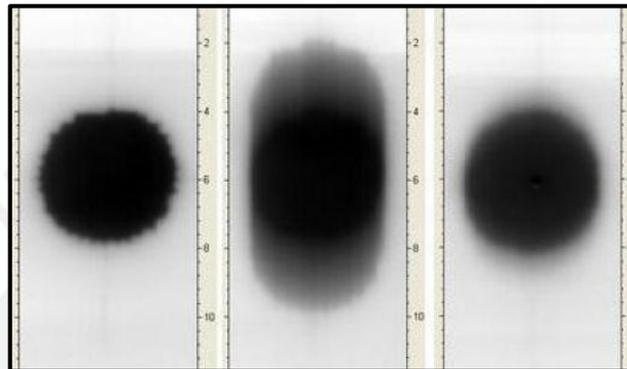


Figura 1.20 - Diferencias en la Calidad radiográfica

Otra consideración a tomar en cuenta es que la velocidad está relacionada directamente con el tamaño de grano de la emulsión; asimismo esta afectará directamente en el contraste que obtengamos en nuestra película. En la tabla 1.3 se puede apreciar la influencia del grano en la velocidad de obtención de películas.

Tabla 1.3 - Características de las Películas

Películas Lentas	Películas Rápidas
Grano grueso	Grano fino
Pobre Resolución	Buena Resolución

1.1.6. Seguridad Radiológica

La radiación destruye las células vivas y la exposición a ella puede definirse como la cantidad de cargas de un mismo signo producidas en un volumen de aire, divididas entre la masa de ese volumen.

- Roentgen (R): Es la radiación que producen $2,083 \times 10^9$ pares de iones en 1 cm^3

Tanto para RX o $R\gamma$, 1R equivale a 1 rad, que es igual a la energía que absorbe cada cm^3 cuando es sometida a 1 R de radiación.

El rem es una unidad que señala los efectos biológicos producidos por la radiación en el hombre, se tiene:

$$1R = 1 \text{ rad} = 1 \text{ rem}$$

En el sistema Internacional

$$1 \text{ rem} = 0.01 \text{ Sv}$$

Existen niveles permisibles de radiación de acuerdo a la actividad que se esté realizando

Público en general

- 1 mSv en un año

Operadores

- 20 mSv/año como promedio en un periodo de 5 años
- En un año la dosis recibida no debe superar los 50 mSv

1.2. Ultrasonido Convencional

1.2.1 Introducción

El ultrasonido se basa en un sistema de vibraciones mecánicas que se transmiten en un medio (componente), a través de ondas de la misma naturaleza que del sonido, pero con frecuencias superiores (ver figura 1.21) a los 20 000 ciclos/segundo (Hz)

Una prueba ultrasónica es el proceso de aplicación de la técnica de ultrasonido y consiste en determinar su sonoridad, espesor o alguna propiedad física en particular. La energía se origina en lo que se conoce como transductor (palpador) el cual provoca el desplazamiento interno de las partículas del material. El transductor es un dispositivo capaz de convertir la energía eléctrica en energía mecánica. La energía eléctrica provoca que un material

piezoeléctrico presente en el transductor se expanda y se contraiga continuamente, provocando así continuas vibraciones mecánicas (ver figura 1.22).

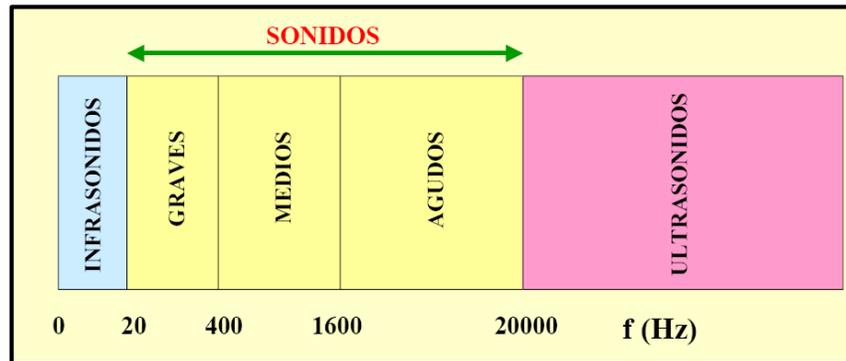


Figura 1.21 - División del sonido según su frecuencia

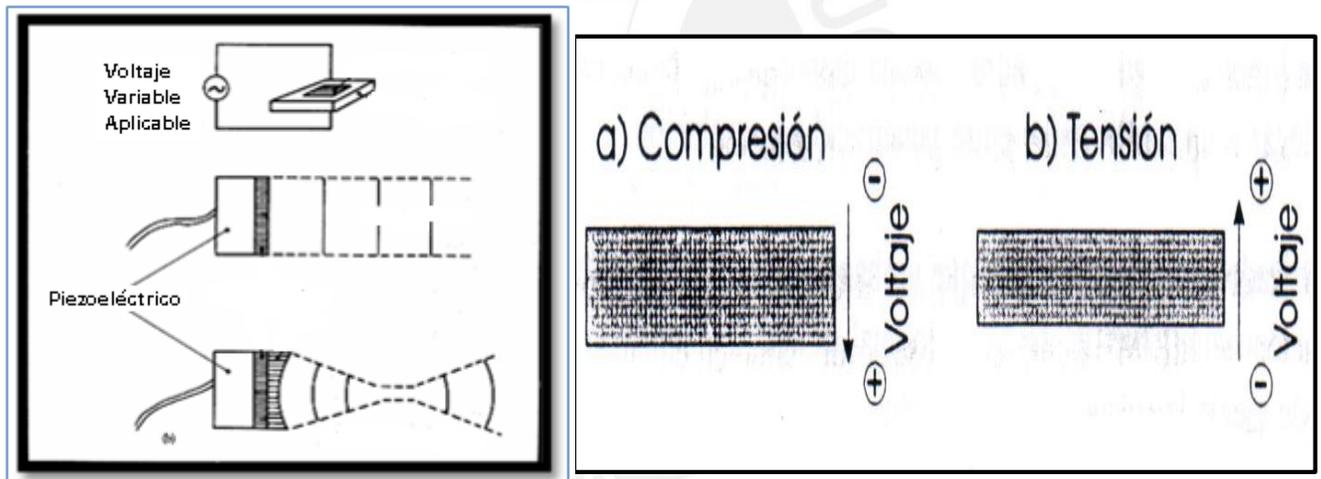


Figura 1.22 - Dispositivo piezoeléctrico (a) y mecanismo de compresión y expansión del elemento piezoeléctrico (b)

Asimismo un transductor piezoeléctrico puede no solo convertir la energía eléctrica a mecánica, sino que también puede hacer lo contrario, con ello se puede decir que el transductor es capaz no solo de emitir, sino también de recibir energía. Sin embargo esta energía de retorno sufre una atenuación respecto de la energía de emitida, ya que se invierte energía en el movimiento de las partículas del material (ver figura 1.23).

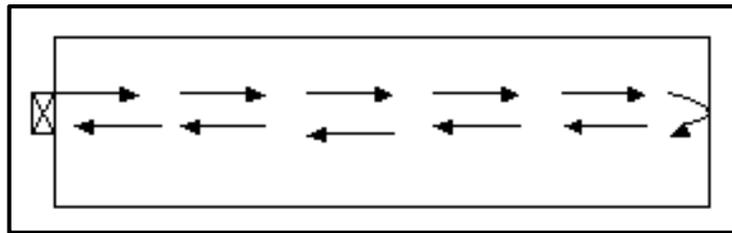


Figura 1.23 - Transmisión de las vibraciones mecánicas a través del material

El ultrasonido posee aplicaciones en diferentes campos tales como: biología, comunicaciones, medicina, construcción, industria metal-mecánica y metalurgia, etc. Principalmente a nivel industrial se utiliza para la detección de discontinuidades o fallas internas en los metales o aleaciones. Asimismo se utiliza mucho en la inspección de uniones soldadas que se presentan en construcciones o en fabricación, mantenimiento de elementos.

Ventajas del Ultrasonido convencional frente a otras técnicas

- Posee gran velocidad de inspección: Debido a que el sistema es electrónico, entrega resultados de forma inmediata, los cuales pueden ser analizados en tiempo real.
- No es perjudicial para el inspector, ni para el medio ambiente: Debido a que no utiliza fuentes de radiación que afecten la salud del personal.
- Alto poder de penetración: Permite detectar discontinuidades a grandes profundidades y evaluar espesores altos variando según sea el material a examinar.
- Mayor exactitud: A diferencia de otros métodos el ultrasonido puede determinar de forma casi exacta la ubicación de la discontinuidad; así como también, puede determinar sus dimensiones, su orientación y su forma.
- Buena resolución y alta sensibilidad: Permite diferenciar dos discontinuidades muy próximas entre sí y puede detectar discontinuidades muy pequeñas respectivamente.

Limitaciones del Ultrasonido convencional

- El ensayo de UT convencional requiere de técnicos experimentados; así como, de mucha atención a la hora de realizar el ensayo.

- Las piezas de geometría muy compleja o de superficies no uniforme son difíciles de examinar. Lo mismo sucede con materiales de grano grueso, porosos o piezas muy pequeñas.
- Alto costo de Equipo y accesorios.
- Se necesita de patrones de referencia para la calibración del equipo; así como de acoplante para mejorar la transferencia de señales entre el transductor y la pieza a inspeccionar.

1.2.2 Haz del Ultrasonido

Normalmente el haz ultrasónico es considerado recto y constante en todo su recorrido; sin embargo, esto no es así ya que si se midiese la intensidad de la sonoridad a diferentes distancias, podrían encontrarse que existen 3 zonas principales en un haz sónico conocidas como: Zona muerta, zona de campo cercano (Fresnel), zona de campo lejano (Fraunhofer); así también veríamos que existe un ángulo de divergencia en el haz (ver figura 1.24).

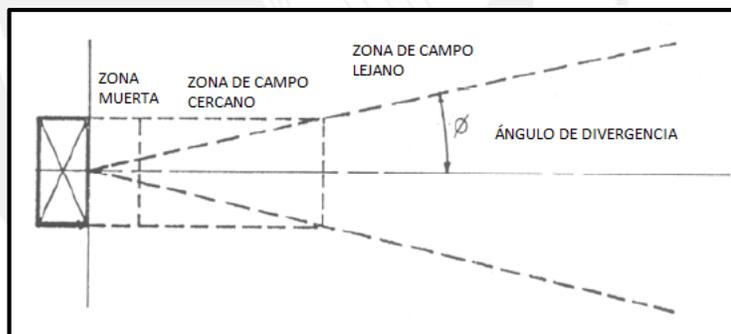


Figura 1.24 - Identificación de las zonas presentes en un Haz Ultrasónico, se muestra también la mitad del ángulo de divergencia.

Zona Muerta

Se debe a la interferencia producida por las vibraciones del cristal, su presencia en el haz ultrasónico está determinada por el tiempo que requiere el cristal para generar un pulso de vibración.

Zona de Campo Cercano o zona de Fresnel

Este campo aparece debido a que la energía es irradiada en todas las direcciones a partir de un solo punto y la presión acústica varía presentándose máximos y mínimos. Esta zona debería tener una forma esferoidal de no ser por los lóbulos laterales que aparecen, producidos por los bordes del cristal.

La longitud del campo cercano se puede calcular y depende de la longitud de onda y de las dimensiones del palpador. Para el caso de un palpador circular el campo cercano puede calcularse como:

$$N = \frac{D_{ef}^2}{4\lambda} = \frac{0,94 * D^2 * f}{4V} \dots \dots \dots (1.2)$$

Donde:

- D_{ef} = Diámetro Efectivo del palpador
- λ = Longitud de Onda
- V = Velocidad

Campo Lejano o zona de Fraunhofer

Esta zona aparece inmediatamente después del campo cercano y es aquí donde la intensidad o presión sonora se estabiliza teniendo un valor mayor cerca al eje del haz y disminuyendo en los límites. De igual forma la presión sonora irá disminuyendo conforme nos alejamos del campo cercano, por efecto de varios factores, uno de estos es el ángulo de divergencia (ver figura 1.25)

El semi-ángulo de divergencia se calcula mediante:

$$\text{Sen}(\theta) = 1,22 \frac{\lambda}{D} \dots \dots \dots (1.3)$$

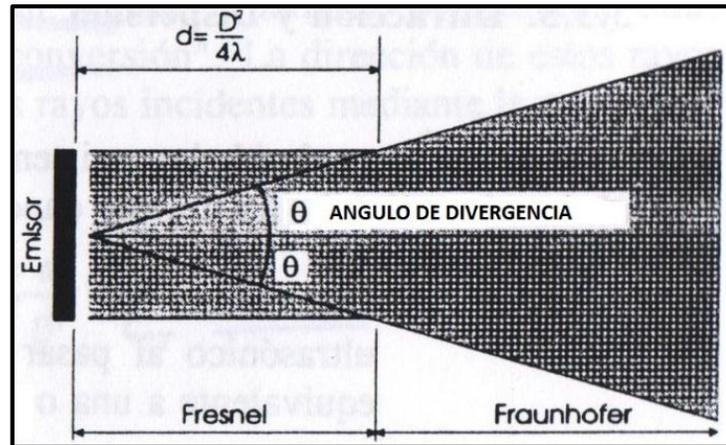


Figura 1.25 - Ángulo de divergencia, el campo cercano y el campo lejano

1.2.3 Modo de recorrido de la Onda ultrasónica

La velocidad es definida como la distancia que recorre una onda en un determinado tiempo, a través de un medio. La velocidad de una onda permanecerá constante a través de ese medio.

Impedancia Acústica (Z)

Es la resistencia que ofrecen los materiales al paso o tránsito de las ondas ultrasónicas. La impedancia acústica se define como el producto de la densidad del material y la velocidad máxima de vibración en él.

$$Z = \rho * V \dots \dots \dots (1.4)$$

Donde:

Z = Impedancia Acústica (kg/m²s)

ρ = Densidad del material (Kg/m³)

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

La siguiente tabla nos muestra algunos valores de impedancia, densidad y velocidad de algunos materiales:

Tabla 1.4 - Propiedades Acústicas de algunos materiales

Material	Densidad (ρ), g/cm ³	Velocidad Acústica 10 ⁵ cm/s			Impedancia Acústica 10 ⁶ g/cm ² · s(d)
		V _l (a)	V _l (b)	V _l (c)	
Metales Ferrosos					
Carbon steel, annealed	7.85	5.94	3.24	3.0	4.66
Alloy steel					
Annealed	7.86	5.95	3.26	3.0	4.68
Hardened	7.8	5.90	3.23	...	4.6
Cast iron	6.95-7.35	3.5-5.6	2.2-3.2	...	2.5-4.0
52100 steel					
Annealed	7.83	5.99	3.27	...	4.69
Hardened	7.8	5.89	3.20	...	4.6
D6 tool steel					
Annealed	7.7	6.14	3.31	...	4.7
Hardened	7.7	6.01	3.22	...	4.6
Stainless steels					
Type 302	7.9	5.66	3.12	3.12	4.47
Type 304L	7.9	5.64	3.07	...	4.46
Type 347	7.91	5.74	3.10	2.8	4.54
Type 410	7.67	5.39	2.99	2.16	4.13
Type 430	7.7	6.01	3.36	...	4.63

1.2.4 Tipos de Onda Ultrasónica

Las vibraciones ultrasónicas viajan en muchos modos y los más comunes son: Longitudinal, transversal, superficial y de plato.

Ondas Longitudinales (Compresión)

Poseen vibraciones de partículas en movimientos de avance y retroceso en la dirección en la que se propaga la onda ultrasónica (ver figura 1.27).

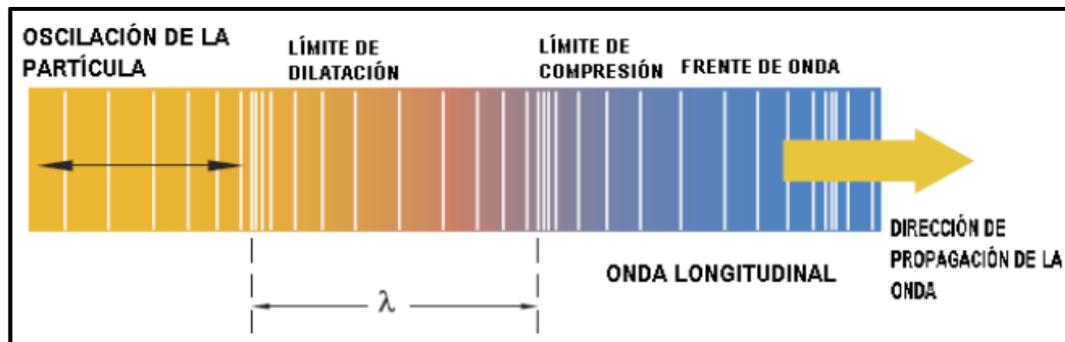


Figura 1.27 - Onda Longitudinal

Ondas Transversales (Corte)

En las ondas transversales sucede que el movimiento de partículas es en sentido perpendicular a la dirección de propagación (ver figura 1.28). En un mismo material se puede decir que la velocidad transversal es aproximadamente 0,5 veces la velocidad longitudinal.

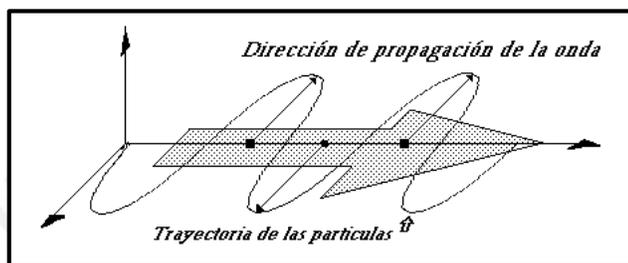


Figura 1.28 - Onda transversal o de corte

Ondas Superficiales (Rayleigh)

Estas ondas viajan a lo largo de la superficie, tanto plana como curva, de un material penetran a una profundidad máxima de una longitud de onda y su velocidad es de 0,9 veces la velocidad transversal para un mismo material. En este caso las partículas tienden a seguir una órbita elíptica. (Ver figura 1.29)

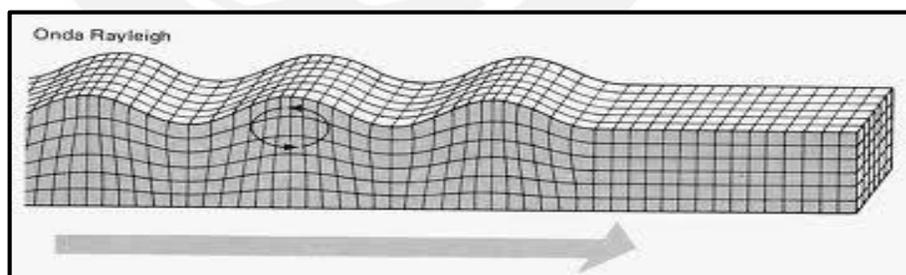


Figura 1.29 - Onda de Rayleigh – órbita elíptica

Ondas de Plato (Lamb)

Son aquellas ondas que tienen la habilidad para propagarse a través de placas delgadas en una variedad de modos de onda dependiendo de varios factores tales como: el espesor de la placa, el ángulo de incidencia y la frecuencia del palpador. (Ver figura 1.30)

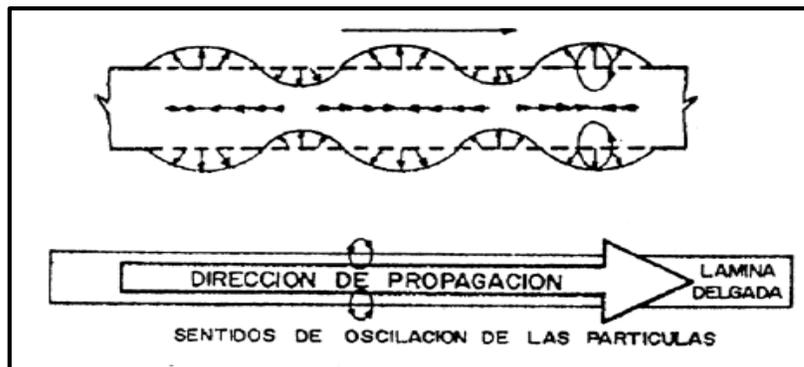


Figura 1.30 - Ondas de Lamb

Incidencia Normal

Se dice que la onda incidente tiene una incidencia normal cuando la dirección en la que se propaga la onda es perpendicular a la interfase, como se aprecia en la figura 1.31 el ángulo de incidencia de la interfase es cero.

Una vez que la onda llegue a la interfase sucederá que parte de la energía de la onda será transmitida a través de la interfase y otra parte será reflejada con el mismo ángulo de incidencia (ver figura 1.31). La cantidad de energía que se refleje dependerá de la relación de impedancias acústicas entre los dos medios involucrados.

Las cantidades de energía transmitida y reflejada pueden ser calculadas mediante las siguientes relaciones.

$$T = \frac{4z_1z_2}{(z_1 + z_2)^2} \dots \dots \dots (1.5)$$

$$R = \frac{(z_2 - z_1)^2}{(z_1 + z_2)^2} \dots \dots \dots (1.6)$$

Siendo:

T: Coeficiente de transmisión de la Intensidad del haz

R: Coeficiente de reflexión de la intensidad del haz

Z_1 : Impedancia Acústica del medio 1

Z_2 : Impedancia Acústica del medio 2

Asimismo la relación entre los coeficientes de reflexión y transmisión de la energía o intensidad será:

$$R + T = 1 \dots\dots\dots(1.7)$$

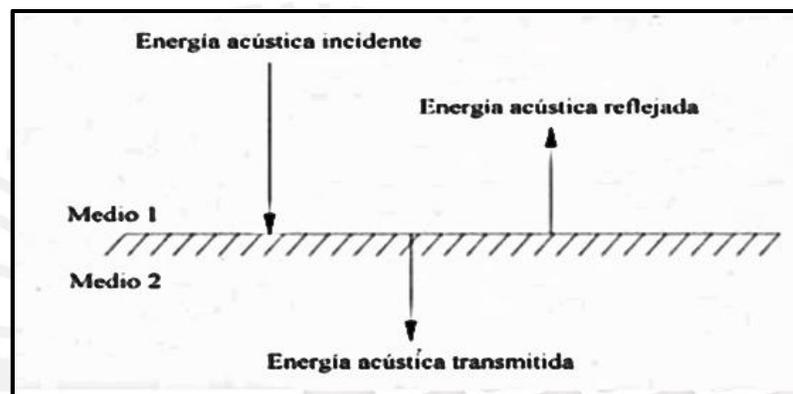


Figura 1.31 - Diagrama Ilustrativo de la transmisión y reflexión de un haz ultrasónico con incidencia normal

Conversión de modo: Tiene lugar cuando un haz de sonido choca con alguna interfase entre dos medios distintos con un ángulo distinto al de 90 grados.

Incidencia Angular

Las ondas ultrasónicas son reflejadas cada vez que ellas encuentran un medio diferente de impedancia acústica, la superficie en la cual ocurre esta reflexión se denomina una “interface”, la cual es la frontera común entre dos materiales de distintas propiedades por ejemplo: Agua-Acero, Aluminio-Acero.

Al haz de energía próxima a una interface se le conoce como “Onda incidente” e ingresa a la interface con un ángulo que se conoce como “Ángulo incidente” (ver figura 1.32).

Ángulo Incidente: Es el ángulo con el cual el haz ultrasónico ingresa a la interface entre dos medios distintos.

Ángulo de Reflexión: Es el ángulo con el cual el haz ultrasónico se refleja luego del impacto con la interface, siempre tiene el mismo valor que el ángulo de incidencia.

Ángulo de refracción: Es el ángulo formado entre el haz refractado en un segundo medio y una línea trazada perpendicularmente a la interface.

Estos ángulos pueden ser determinados a partir de la Ley de Snell (Ley de reflexión y refracción), ya que nos permite saber las direcciones que toman cada una de las ondas luego de la interface.

$$\frac{\text{Sen}(\alpha)}{\text{Sen}(\theta)} = \frac{V_1}{V_2} \dots \dots \dots (1.8)$$

Donde:

α = Ángulo de Incidencia

θ = Ángulo de Refracción

V_1 = Velocidad en el medio 1

V_2 = Velocidad en el medio 2

Primer ángulo crítico

A medida que aumentamos el valor del ángulo de incidencia, automáticamente los valores que poseen los ángulos de reflexión y refracción aumentarán según la Ley de Snell; de ello se define al primer ángulo crítico al ángulo de incidencia que produce un ángulo de refracción de haz longitudinal (θ_L) igual a 90°

Segundo ángulo crítico

Basándonos en la Ley de Snell, podemos definir al segundo ángulo crítico al ángulo de incidencia que produce un ángulo de refracción del haz transversal (θ_T) producido en el segundo medio sea igual a 90° . (Ver figura 1.33)

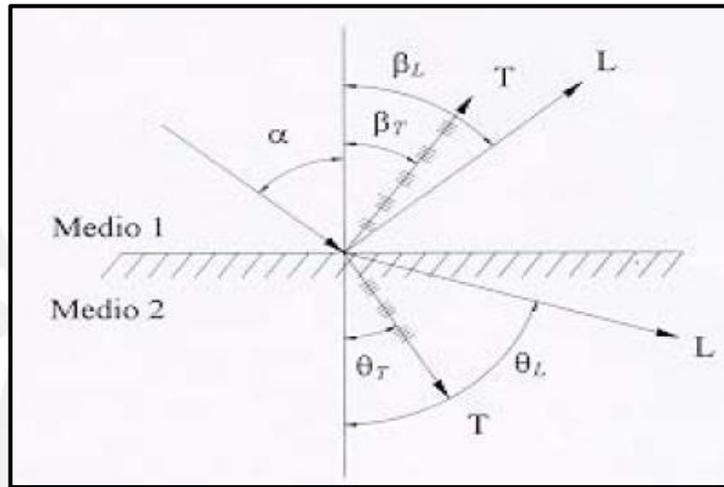


Figura 1.32 - Transmisión y reflexión del haz ultrasónico incidente

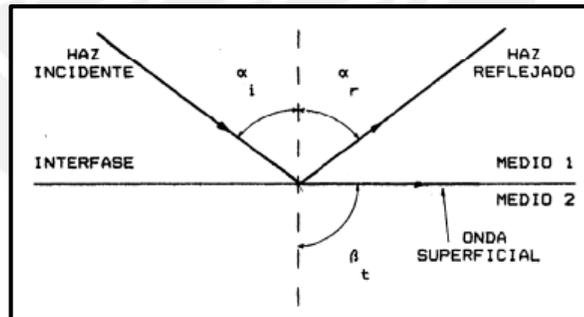


Figura 1.33 - Esquema del segundo ángulo crítico

1.2.5 Sistemas básicos de transmisión ultrasónica

Pulso – Eco

Es el sistema más utilizado, inicia cuando pulsos son emitidos dentro el material que está siendo inspeccionado, estos pulsos se reflejan desde las discontinuidades en su recorrido o desde cualquier otra frontera que ellos choquen. En esta transmisión se busca poder valorar

el tiempo que transcurre entre el viaje de ida y retorno del haz ultrasónico, de tal forma que se pueda conocer la distancia a la que se encuentra dicha discontinuidad (ver figura 1.34).

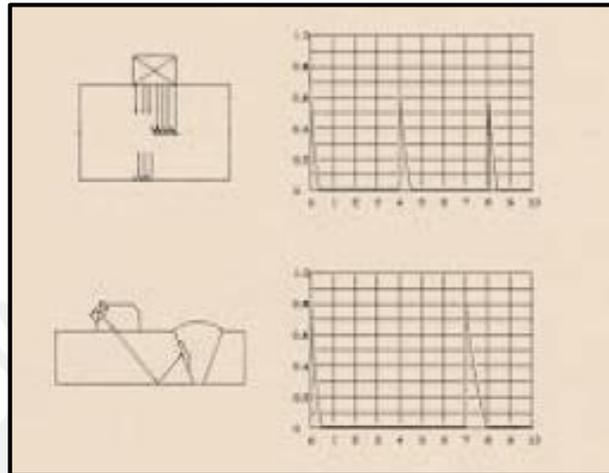


Figura 1.34 - Transmisión pulso-eco incidencia normal e incidencia angular

Transmisión pasante

En este caso se hace uso de dos palpadores, el primero es el que emite los pulsos ultrasónicos y el segundo está encargado de recibir la señal. El método se fundamenta principalmente en las variaciones de transmisión de energía ya sea por discontinuidades, microestructura, etc. (Ver figura 1.35).

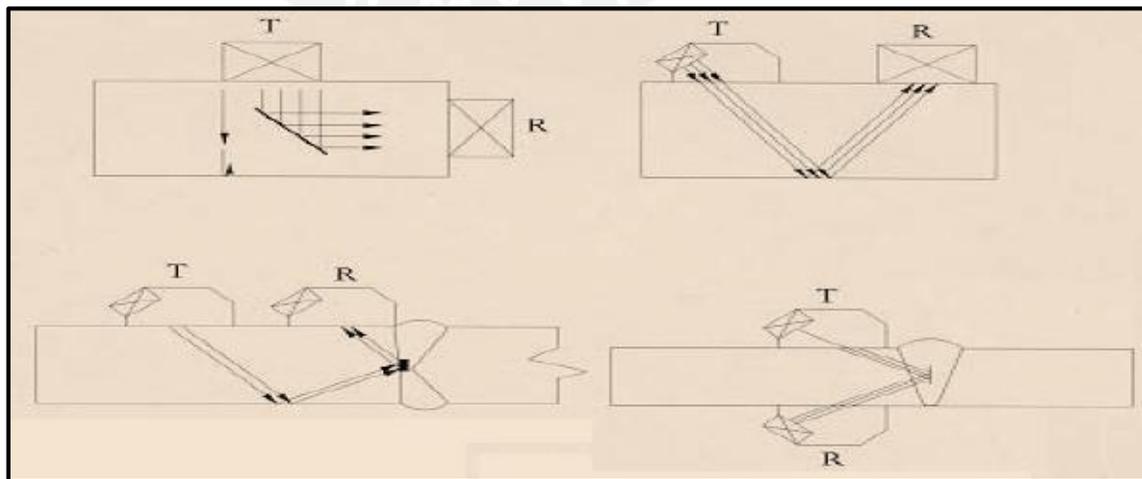


Figura 1.35 - Transmisión pasante

Existen dos métodos que se usan normalmente en pruebas de ultrasonido

-Prueba de contacto: Se le llama así a la prueba en la cual, el transductor está acoplado utilizándose una capa muy fina de acoplamiento, que ayudará a mejorar el contacto entre ellos y facilitara la transmisión de energía.



Figura 1.36 - Prueba de contacto directo

-Prueba de Inmersión: Se le llama así a la transmisión de ultrasonido que se lleva a cabo bajo una columna de líquido, de tal forma que no exista contacto directo, ni rozamiento entre el palpador y el material (ver figura 1.37)

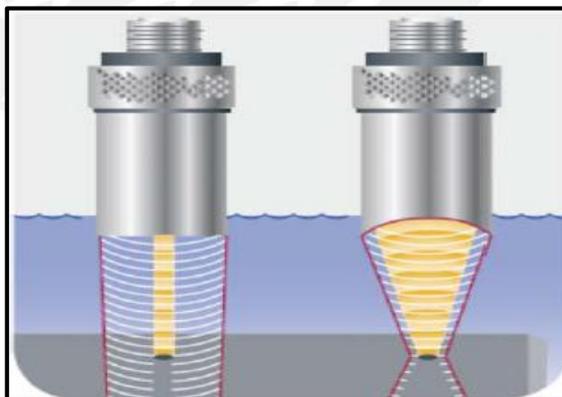


Figura 1.37 - Prueba de Inmersión

1.2.6 Equipo Básico de Ultrasonido Convencional

- Equipo de ultrasonido

- Transductor o Palpador
- Bloques de Calibración
- Componente o Pieza a inspeccionar
- Acoplante

Equipo de Ultrasonido

Es el encargado de poder mostrar las señales que son recibidas por el palpador o transductor de tal forma que estas puedan ser analizadas por los especialistas. Los equipos de ultrasonido convencional (ver figura 1.38) permiten mostrar los resultados hasta en 3 vistas: A-Scan, B-Scan y C-Scan.



Figura 1.38 – Equipo de Ultrasonido Convencional

Transductor o Palpador

Es el encargado de emitir las vibraciones a altas frecuencias, el material del cristal que se encuentra dentro de un transductor ultrasónico (ver figura 1.39) esta hecho de materiales piezoeléctrico tales como el cuarzo, sulfato de litio, titanato de bario y cerámicas polarizadas.

La capacidad de un transductor es descrita por tres propiedades:

Sensibilidad: Es la habilidad que posee un transductor para detectar discontinuidades muy pequeñas, este dependerá mucho de las frecuencias que se utilicen; mientras más alta sea la frecuencia utilizada mayor será su sensibilidad.

Resolución: Es la habilidad que posee un transductor para separar reflexiones de sonido de dos discontinuidades muy próximas entre sí.

Eficiencia: Es la efectividad que posee un transductor en la conversión de energía.



Figura 1.39 - Diferentes tipos de palpadores o transductores

Bloques de Calibración

Son aquellos bloques que pueden ser un bloque o conjunto de bloques con discontinuidades artificiales o con defectos conocidos utilizados para la calibración de equipos de ultrasonido y para la evaluación de discontinuidades.

Una característica importante que deben tener los bloques de calibración es que deben poseer las mismas propiedades tanto físicas o químicas de la estructura del material a inspeccionar (ver figura 1.40).

Acoplante

Los acoplante que se usan normalmente para las inspecciones de contacto directo son: Agua, glicerina, grasas, etc.

Deben tomarse algunas consideraciones para la selección del acoplante correcto:

- Acabado superficial
- Posibilidad de reacción entre el material y el acoplante

- Temperatura de superficie de prueba.

El acoplante nos ayuda ya que nos proporciona:

- Una lubricación adecuada para fácil movimiento del transductor sobre la superficie del componente.
- Moja la superficie de prueba y la superficie del transductor removiendo el aire que pueda haber entre ellas.
- Es homogéneo y libre de partículas sólidas o burbujas.

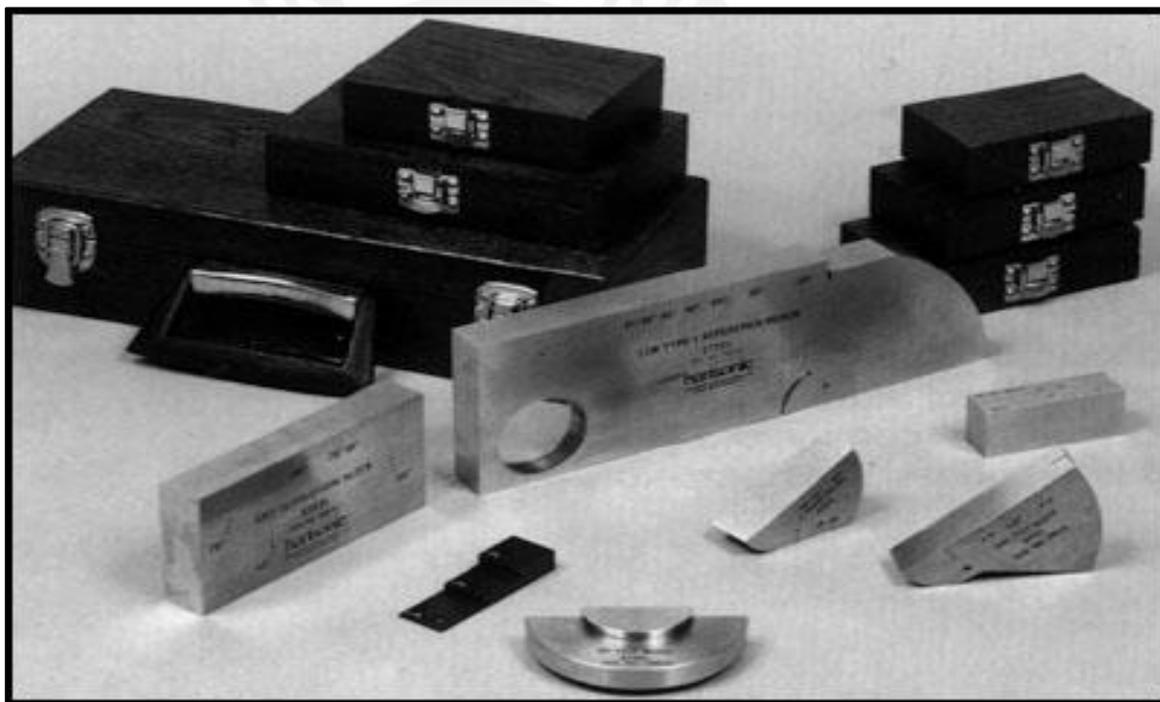


Figura 1.40 - Diferentes tipos de patrones o bloques de calibración

1.3. Ultrasonido *Phased Array* (UTPA)

Ultrasonido *Phased Array* (UTPA), es una técnica que inició su desarrollo en los años 60; sin embargo, fue a partir de una década después que se utilizó en la medicina para la realización de diagnósticos, esta se utilizaba para crear imágenes de sección del cuerpo humano (ver figura 1.41)



Figura 1.41 – Aplicaciones Médicas de Ultrasonido *Phased Array*

Durante mucho tiempo el método de UTPA fue únicamente utilizado para el campo de la medicina, esto se debió principalmente a que esta técnica se utilizaba para la examinación de la composición y estructura el cuerpo humano; y estos datos eran conocidos, ya que entre las propiedades eran similares para los cuerpos. Por otro lado a nivel a industrial era mucho más compleja la aplicación, y representaba un desafío mucho mayor, ya que en la industria existen diversos materiales, diferentes propiedades, diferentes espesores y geometrías, lo que generaba diferentes propiedades acústicas y hacía más complicado el alcance de la técnica en la industria.

Es a inicios de 1980 que la tecnología del ultrasonido *Phased Array* se traslada desde el campo de la medicina al sector de la industrial; sin embargo, este equipo era demasiado grande y requería que la información de la inspección sea trasladada a una computadora para que sea procesada y para que la imagen pueda ser observada. Este tipo de inspecciones se realizaron principalmente en servicios de generación de poder, es por ello que se podría decir que el impulso de la tecnología *Phased Array* fue impulsada por el sector nuclear, donde las inspecciones y el control de calidad tiene que hacerse con una gran precisión.

Es a inicios de 1990, donde el UTPA fue incluido como un nuevo método de examinación no destructiva en libros y manuales de ultrasonido principalmente su aplicación estaba dedicada a grandes ejes forjados y componentes de turbinas de baja presión.

Y es recién a principios de los años 2000 que se implementa un equipo para la industria de UTPA portable; sin embargo, este poseía un diseño analógico y poseía ciertas limitaciones. Sin embargo, con el rápido desarrollo de la electrónica, permitió que el desarrollo de estos equipos aumentara de una forma mucho mayor mejorando sus herramientas, el procesamiento de información, la pantalla para el análisis en tiempo real de la información; todo esto abrió las puertas para la aplicación de este método a un nivel industrial mucho mayor.

Un sistema de Arreglo de fases (*Phased Array*) posee el mismo principio de funcionamiento que el de un ultrasonido convencional, el cual utiliza vibraciones mecánicas inducidas en un medio elástico (material), excitadas por un transductor piezoeléctrico que se activa gracias a una diferencia de potencial. Las frecuencias típicas dentro de las cuales se usa este tipo de ondas ultrasónicas está en el rango de 0.1 MHz a 50 MHz; sin embargo, la mayoría de las aplicaciones industriales requieren un rango entre 0.5 MHz y 15 MHz.

La principal diferencia entre el UTPA y UT-Convencional es que el ultrasonido *Phased Array* consiste en un conjunto de 16 hasta 256 pequeños elementos individuales y cada uno de ellos puede ser pulsado de forma distinta (ver figura 1.43). Por otro lado el UT-convencional posee solo un elemento, es decir solo un haz de sonido. (Ver figura 1.42)

Estos elementos pueden ser arreglados de diferentes maneras (arreglos lineales, circulares o anulares). Este tipo de sistemas posee una gran flexibilidad ya que puede concentrarse en diferentes puntos, a diferentes profundidades en un mismo momento dependiendo del arreglo que se requiera o el que se esté realizando. (Ver figura 1.44)

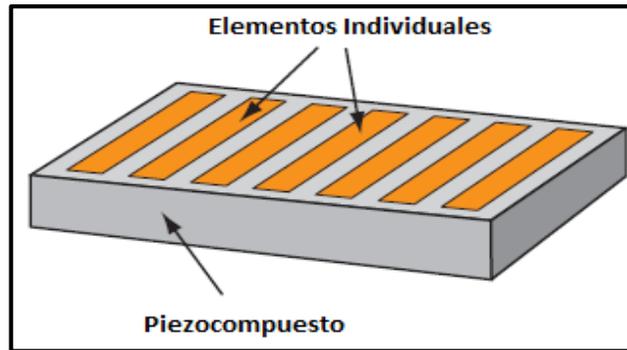


Figura 1.42 – Construcción típica de Múltiples-elementos

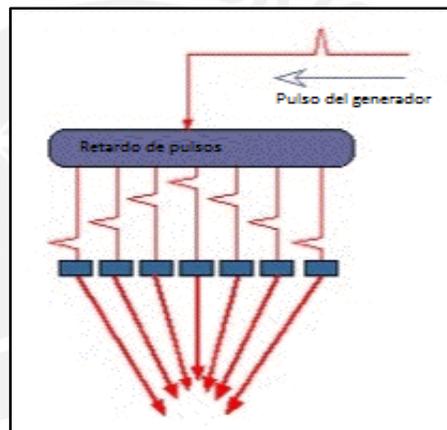


Figura 1.43 - Retardo de pulsos en los elementos del transductor

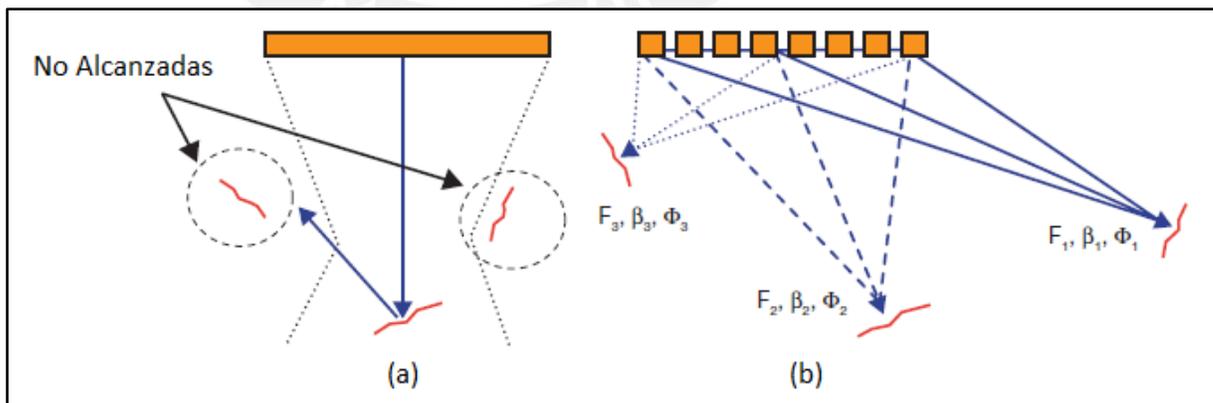


Figura 1.44 - Detección de fisuras con diferentes orientaciones mediante un monocristal (a) y múltiples elementos (b)

Ultrasonido *Phased Array* utiliza un principio de sobreposición (“phasing”). El cual es una variación del tiempo entre las pulsaciones de los elementos de tal forma que se genere un frente de onda por la combinación de las diferentes pulsaciones entre elementos. Estas pulsaciones pueden ser retardadas en el tiempo y sincronizadas en fase y amplitud, de tal forma que pueda crear un haz ultrasónico focalizado con la capacidad de ser direccionado (ver figura 1.45). Asimismo una de las características principales de esta nueva tecnología es que posee un control computarizado de la excitación de cada uno de los elementos, esto permite que se puedan modificar parámetros del haz tales como: el ángulo, la distancia focal y medida del punto focal, todo eso a través del software.

El funcionamiento empieza cuando el instrumento emite una señal con un pulso de alto voltaje siguiendo los parámetros de ancho de banda y retardo del tiempo definidos ambos por la ley focal.

Cada uno de los elementos recibe únicamente un pulso y la combinación crea un haz con un ángulo específico y una focalización a una determinada profundidad. El haz viaja a través del material toca el defecto y retorna al transductor, donde estas señales son recibidas y son reunidas para formar un pulso electrónico que es procesado y posteriormente analizado por el inspector.

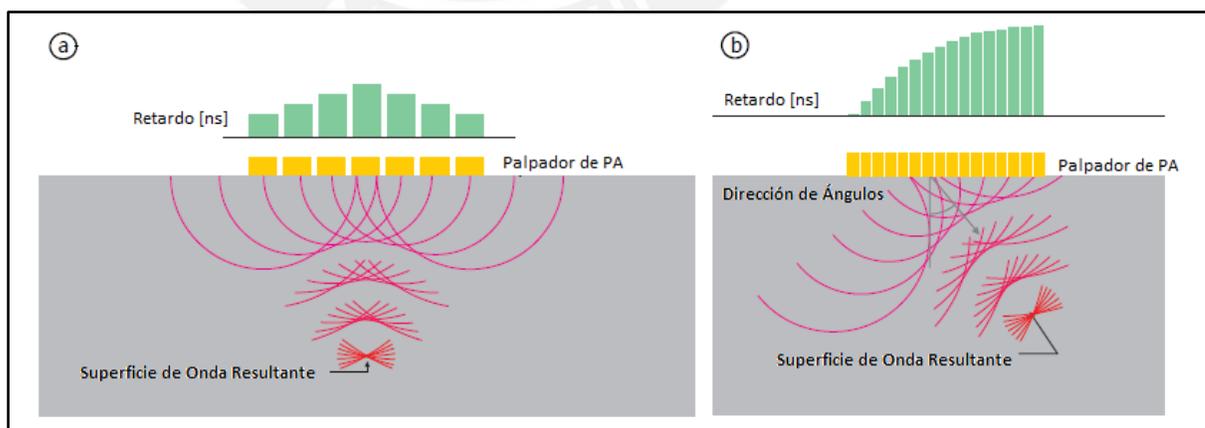


Figura 1.45 - Principio de Focalización para (a) haz normal y (b) haces de ángulos incidentes

Ventajas del *Phased Array* comparado con el Ultrasonido convencional

En un principio el alcance del ultrasonido *Phased Array* cubre ampliamente todos los campos donde el ultrasonido convencional puede ser utilizado. Inspección de soldaduras detección de fisuras o discontinuidades son las aplicaciones más comunes y este de tipo de aplicaciones se da en industrias tales como aeroespaciales, generación de energía, petroquímica, construcción de tuberías, estructuras metálicas, etc.

Los beneficios del UTPA respecto de UT-convencional pasan por la tenencia de múltiples elementos que permiten direccionar, focalizar y tener haces de escaneo con un único transductor. La posibilidad de tener diferentes ángulos a partir de un solo transductor nos permite incrementar grandemente la posibilidad de detección de anomalías, ayudado además por la posibilidad de focalizar a diferentes profundidades que ayudarán de gran manera para el dimensionamiento y ubicación de las discontinuidades; así como, reducirán el tiempo de trabajo, ya que la velocidad de inspección puede ser hasta 10 veces más rápida que la de ultrasonido convencional.

La desventaja potencial que existe entre los sistemas de *phased array* respecto de UT-convencional es que el costo de los equipos involucrados; así también, el costo de la inspección realizada es mucho mayor; sin embargo, este costo se ve compensado por la flexibilidad que posee el UTPA y la gran reducción en el tiempo de inspección.

1.3.1 Conceptos Básicos

1.3.1.1 Principios

Como ya se ha dicho las ondas ultrasónicas son vibraciones mecánicas inducidas en un medio elástico (una pieza de prueba) emitido a través de un elemento piezoeléctrico gracias a un voltaje, estos elementos suelen tener unas frecuencias que oscilan entre el rango de 0.5 MHz y 15 MHz.

Como se dijo en el capítulo 1, la gran diferencia entre el ultrasonido convencional y el ultrasonido *Phased Array* es la cantidad de elementos que se tienen y que permiten detectar

con mayor facilidad cualquier indicación presente en la pieza evaluada. Sin embargo, ambos poseen y funcionan bajo los mismos principios básicos.

Existen gran cantidad de fenómenos asociados con las ondas de sonido, cuando ellas encuentran un cambio en el medio. Las ondas de sonido presentarán ciertos cambios cuando ellos encuentren un límite en el medio. Dependiendo de las propiedades acústicas de los dos medios, las ondas pueden reflejarse en el límite o transmitirse a través del límite en el nuevo medio. Las ondas transmitidas a través del límite pueden refractarse dependiendo de la velocidad del sonido en el segundo medio.

- Reflexión de Ondas

Este es el proceso cuando una onda encuentra un límite entre dos medios, rebota y retorna al primer medio. Por ejemplo, una luz chocando un espejo. Esta función de las ondas mecánicas pueden ser de dos formas: reflexión total (fuerte) o parcial (suave). Las reflexiones totales se reflejan toda la emisión a la fuente. Las reflexiones suaves o parciales son la base de la transmisión en ultrasonido. En este caso, una porción del sonido es transmitido a través de la interferencia acústica de dos materiales acoplados.

- Refracción de Ondas

Cuando una onda viaja de un medio a otro, esta es doblada o refractada en el límite. La onda cambia de dirección y recibe un pequeño cambio en su longitud de onda. El grado de refracción está relacionado directamente con las velocidades a través de los cuales a viajado. La refracción de ondas es una propiedad que dirige el diseño de zapadas y la influencia de los cálculos de la ley focal en arreglos de fases.

- Difracción de Ondas

La difracción ocurre cuando un obstáculo o defecto interactúa con una onda. Es la habilidad de la onda para esparcirse a través de esquinas. La difracción puede ocurrir en el borde de un obstáculo.

La principal característica de la tecnología de Arreglo de Fases es el sistema de excitación controlado por computadora (Amplitud y retardo) de los elementos individualmente en un

palpador multielemento. La excitación controlada permite generar un haz ultrasónico focalizado con la posibilidad de modificación de los parámetros tales como los ángulos, las distancias focales, y el tamaño del punto focal de tal forma que mejoren la recepción de las señales en la determinación de discontinuidades presentes en una pieza en prueba.

Para generar un haz en fase con una interferencia constructiva, los diferentes elementos son pulsados en pequeñas variaciones de tiempo, de tal forma que la interferencia genere un frente de onda con capacidad de dirección (ver figura 1.46). Estos valores de retardo o *delay* en cada elemento depende en la apertura del arreglo de fases de los elementos activos, en el tipo de onda a utilizarse (longitudinal o transversal), en el ángulo refractado y en la distancia focal.

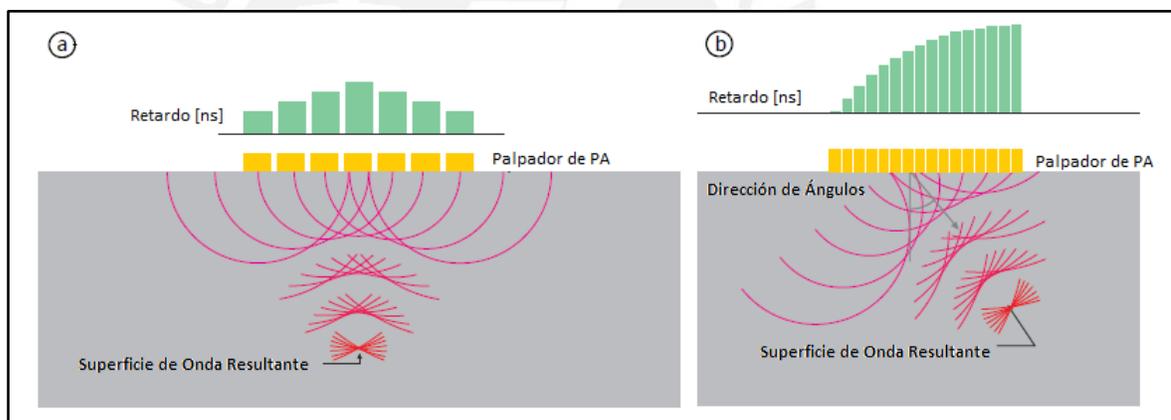


Figura 1.46 - Principio de generación del frente de onda debido a los retardos para ángulo 0° y para un ángulo diferente de 0°

1.3.1.2. Leyes de Retardo, o Leyes Focales

Las leyes de retardo, se refiere a las variaciones de tiempo entre elementos de un transductor de arreglo de fases. Estas leyes varían de acuerdo a muchos factores, por ejemplo: cantidad de elementos a utilizarse, si se utiliza o no una zapata de ángulo, la separación o *pitch* entre elementos del transductor y los ángulos a utilizar.

Las gráficas de retardo (retardo vs N° de elementos) pueden tener diferentes formas, basadas en el principio de Fermat sobre el mínimo tiempo de llegada a lo largo de un recorrido específico.

En la figura 1.48 se muestra una gráfica de cómo se deben aplicar los retardos que a cada uno de los elementos utilizando una zapata de Plexiglás.

En la figura 1.49 se muestra una gráfica de cómo se deben aplicar los retardos en el caso de uso de un transductor en contacto directo con la pieza a evaluar.

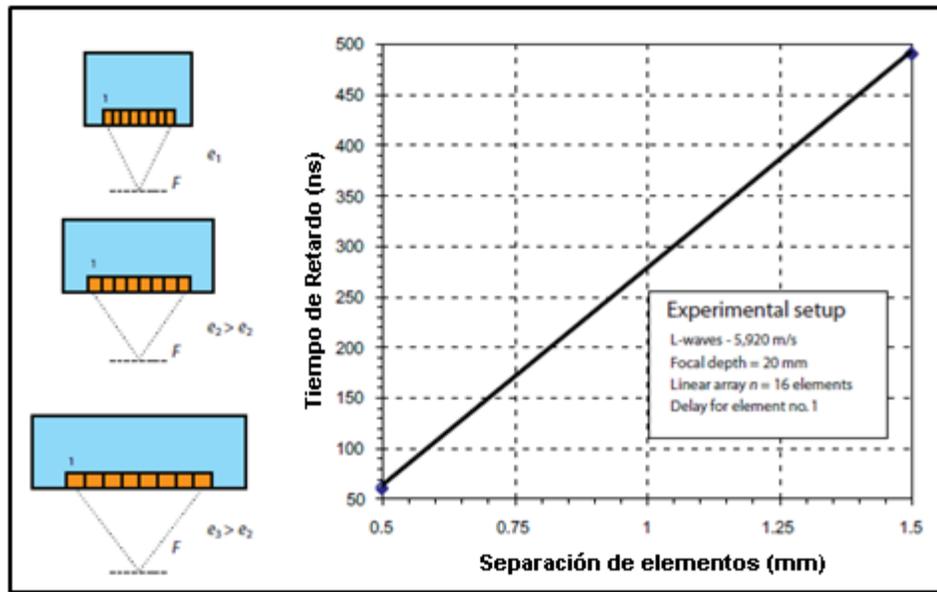


Figura 1.47 – Dependencia del retardo con respecto al tamaño de separación entre elementos

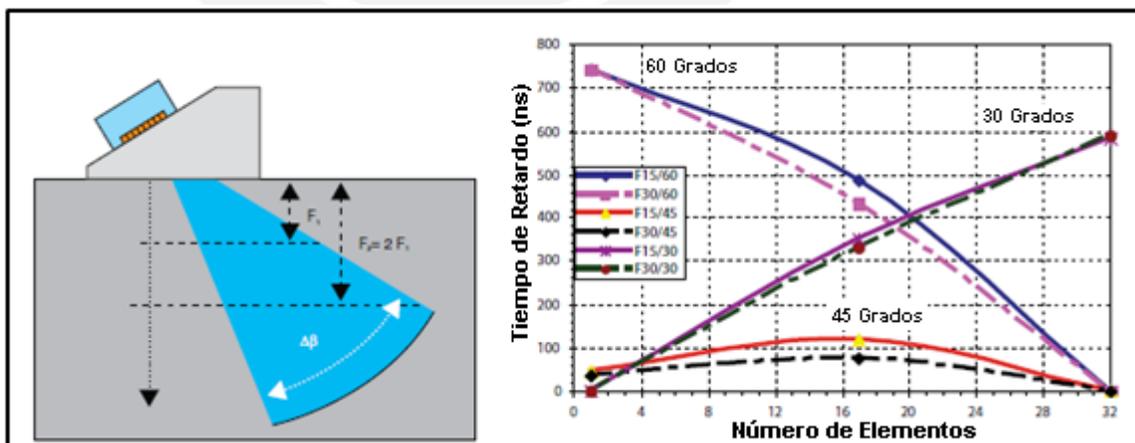


Figura 1.48 – Ejemplo de la dependencia del retardo con un ángulo refractado

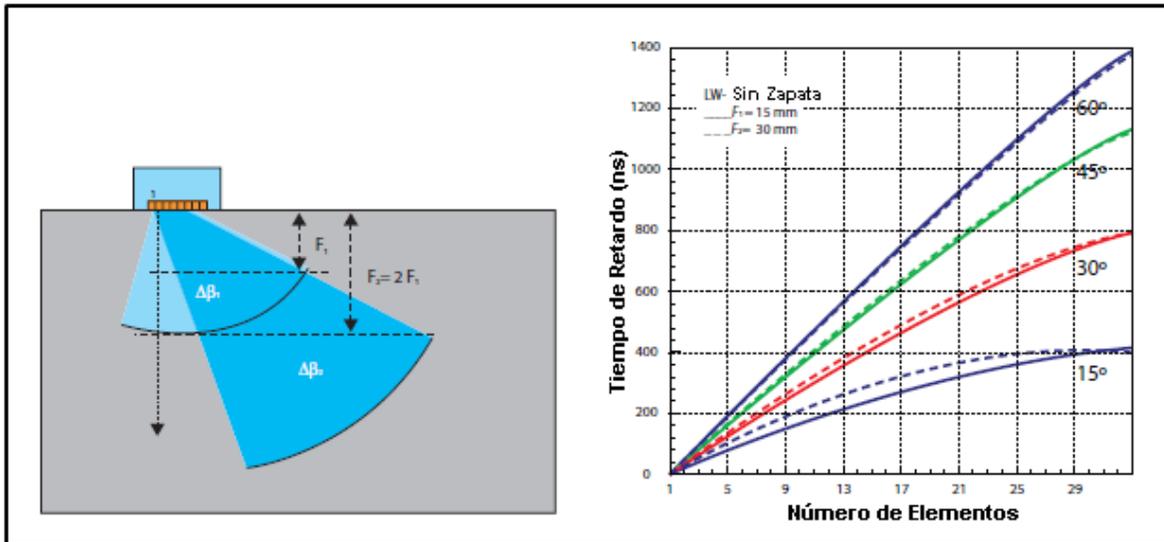


Figura 1.49 – Ejemplo de la dependencia de un ángulo generado sin utilizar zapata alguna

1.3.2 Principios de Funcionamiento

1.3.2.1 Componentes Básicos en un sistema de Arreglo de Fases

Los principales componentes requeridos para un sistema de escaneo básico con instrumentos de Arreglo de Fases son mostrados en la figura 1.50.

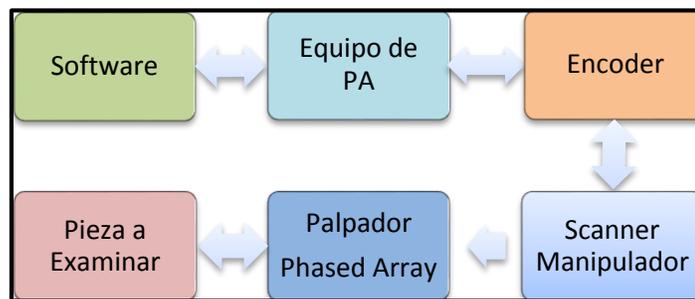


Figura 1.50 – Componentes básicos de un sistema de Arreglo de Fases

Durante la transmisión, el instrumento de adquisición envía una señal de disparo al instrumento de arreglo de fases. Este último convierte la señal en un pulso de alto voltaje con un ancho y un tiempo de retardo definido en las leyes focales. Cada elemento recibe solamente un pulso. Esto crea un haz con un ángulo específico y a una profundidad de focalización específica.

Las señales son recibidas, y luego desplazadas en el tiempo de acuerdo con la ley focal recibida. Estas son luego puestas juntas de tal forma que formen un único pulso ultrasónico que es enviado al instrumento de adquisición. En la figura 1.51 se muestra un diagrama representativo de la transmisión y recepción de señales en un sistema de arreglo de fases:

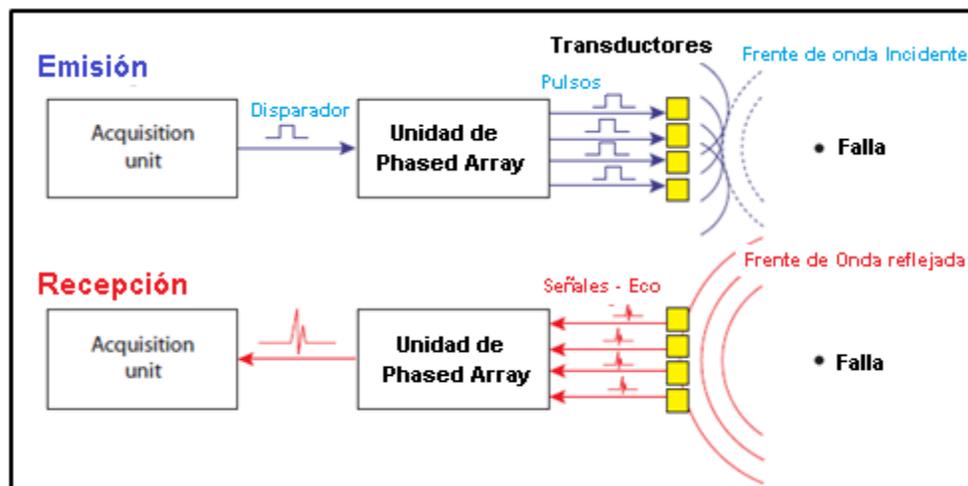


Figura 1.51 – Emisión y Recepción de señales desde la unidad de adquisición hasta una indicación.

1.3.2.2 Escaneo

Existen 3 principales modos de escaneo que son controlados por la computadora:

- Escaneo Electrónico: También llamado E-scan, y originalmente llamado escaneo lineal. Consiste en que la misma ley focal y el mismo retardo sean generados a lo largo de un grupo de elementos activos; el escaneo es realizado dado un ángulo constante y a lo largo de la longitud de un transductor de *Phased Array* por un grupo de elementos activos, llamado Apertura virtual del transductor (VPA). Esto es equivalente a un transductor de ultrasonido convencional realizando un mapeo de corrosión o una inspección mediante ondas transversales. (ver figuras 1.52 y 1.53)
- Estos elementos pueden ser arreglados de diferentes maneras (arreglos lineales, circulares o anulares). Este tipo de sistemas posee una gran flexibilidad ya que puede concentrarse en diferentes puntos, a diferentes profundidades en un mismo momento dependiendo del arreglo que se requiera o el que se esté realizando. (Ver figura 1.44)

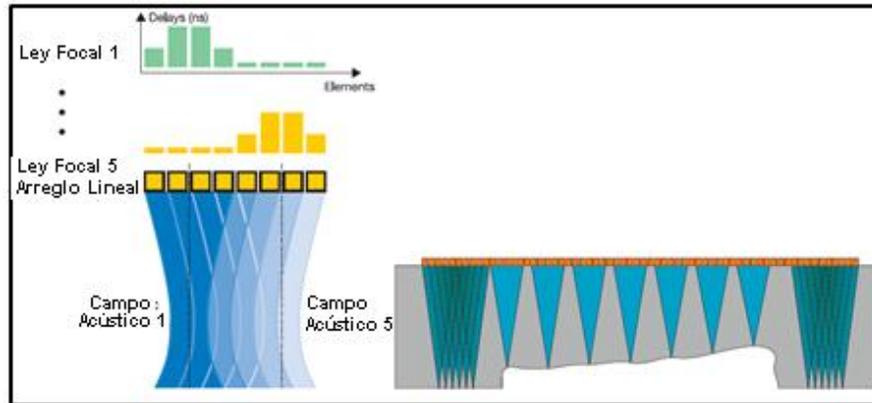


Figura 1.52 - Escaneo electrónico, en este caso la apertura virtual consiste en 4 elementos. La ley focal 1 es activa para los elementos de 1-4, mientras que la ley focal 5 es activa para los elementos de 5-8.

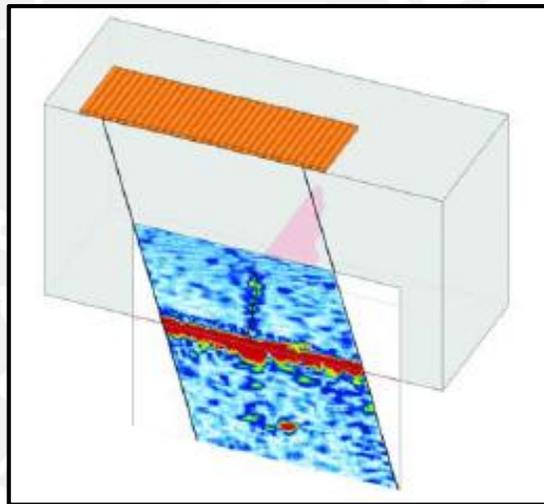


Figura 1.53 – Ejemplo de un escaneo electrónico con ondas longitudinales para la detección de fisuras en una fundición.

- Escaneo Sectorial: También llamado S-Scan, escaneo Azimutal o escaneo angular. El haz ultrasónico es disparado a través del rango angular para una profundidad focal específica, usando los mismos elementos. El inicio y el final del rango de ángulos depende del diseño del transductor, la zapata a utilizar y el tipo de onda a utilizar. El rango es dictado por las leyes de la física. Asimismo pueden añadirse otros rangos de disparo con diferentes profundidades de focalización utilizando elementos restantes del transductor. (ver figura 1.54)

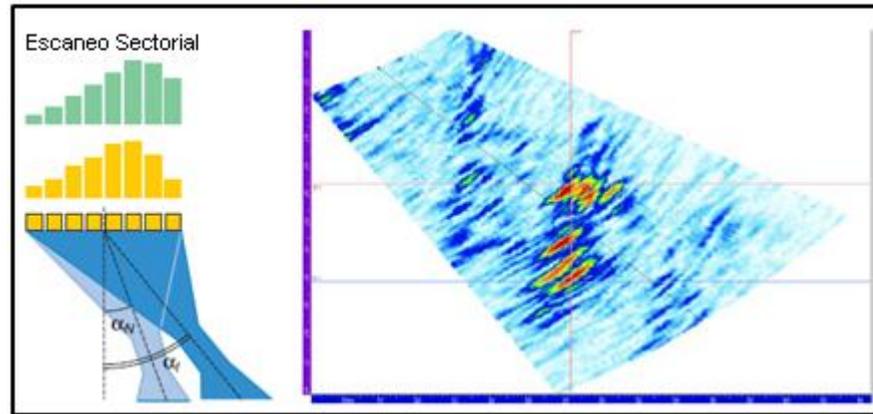


Figura 1.54 - Izquierda. Principio de escaneo sectorial. Derecha. Ejemplo de visualización de fisuras utilizando un escaneo sectorial con un rango de 33° a 58° .

- Focalización de profundidad dinámica (DDF): Este escaneo es realizado con diferentes profundidades de focalización (ver figura 1.55). En la práctica, un solo pulso de focalizado es transmitido, y la re-focalización es realizada en la recepción para todas las profundidades programadas.

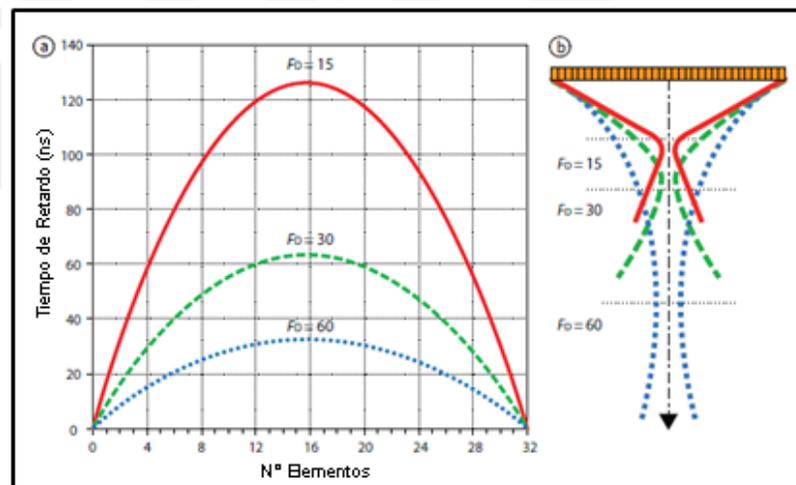


Figura 1.55 - Valores de retardo (izquierda) y principios de profundidad de escaneo (derecha).

1.3.2.3 Visualización básica

La visualización del *Phased Array* provee al usuario con la habilidad de ver relativamente cambios punto por punto y detectar respuestas de defectos multi-angulares, lo que puede ayudar en la discriminación y dimensionamiento de discontinuidades. En un principio puede

parecer complejo, pero en realidad esto puede simplificar las inspecciones eliminando los diferentes, complejos y múltiples transductores que son requeridos usualmente con el ultrasonido convencional

Una de las grandes ventajas del UTPA es que al combinar una gran cantidad de ángulos, permite tener una imagen global y una información rápida de lo que se está observando y las posibles discontinuidades detectadas en el rango ultrasónico. En la figura 1.56 se puede observar la visualización básica (Escaneo Sectorial o S-Scan) de una inspección por UTPA, en la cual nosotros podemos notar rápidamente una dimensión aproximada de lo que se está observando en el interior de un material de prueba. SI bien el S-Scan es la visualización más importante que posee un instrumento de arreglo de Fases, no es el único, ya que equipos avanzados muestran vistas laterales, de fondo y superior; que combinadas nos dan una visualización en 3D, que nos permitirá observar donde se ubica exactamente la discontinuidad y nos ayudará a comprender qué tipo de discontinuidad es la que se está observando.

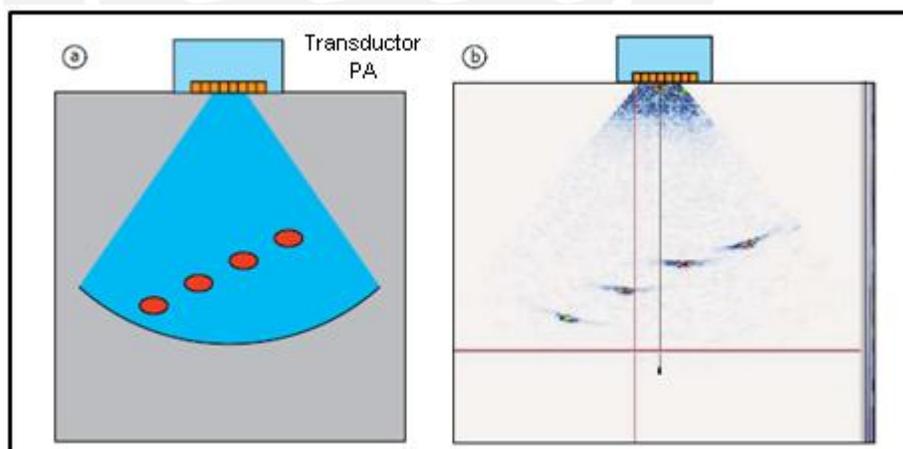
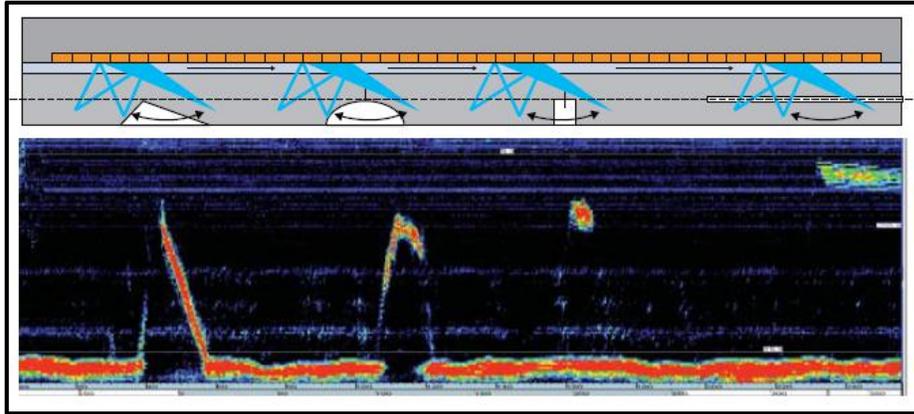


Figura 1.56 – Detección de Agujeros en un pieza de prueba a) Diagrama de escaneo sectorial, b) Visualización real de las indicaciones.

El escaneo sectorial (S-Scan) ofrece los siguientes beneficios:

- Visualización de imagen durante el escaneo.

- Representación de la verdadera profundidad.
- Reconstrucción volumétrica en 2-D.



- Figura 1.57 – Visualización de defectos artificiales utilizando un escaneo B-Scan (lateral)

1.3.2.4 Vistas de Ultrasonido

Las vistas de ultrasonido son imágenes definidas por diferentes vistas de plano, en la figura 1.58, se observa las diferentes vistas que se obtienen en la inspección de una pieza y nos muestra las diferentes perspectivas de un defecto al utilizar cada una de ellas.

Las vistas básicas de ultrasonido son: A-scan, B-scan, C-scan, D-scan, S-scan, Vista polar

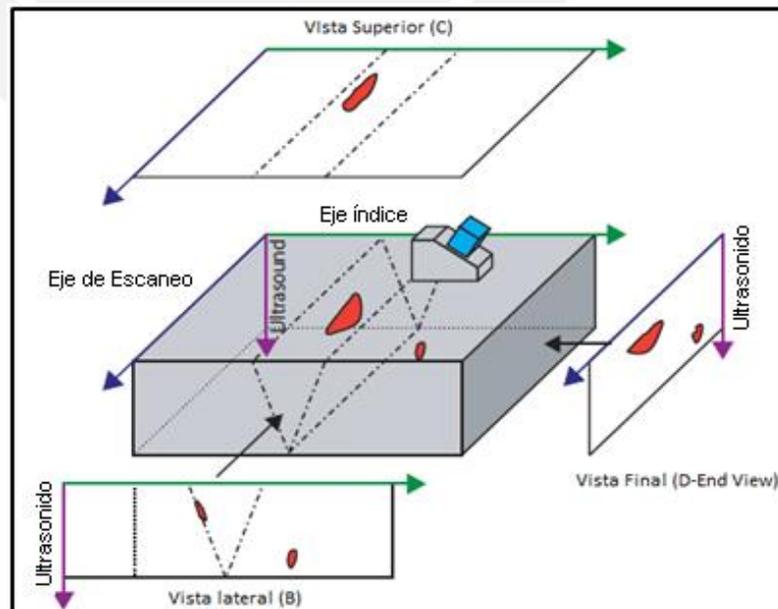


Figura 1.58 – Esquema de las vistas en un arreglo de fases

A) Visualización A-Scan

Es la representación o vista del pulso recibido versus el tiempo de vuelo (del haz ultrasónico). Un A-scan puede ser representado como una radiofrecuencia o como una señal bipolar rectificada. (Ver figuras 1.59 y 1.60)

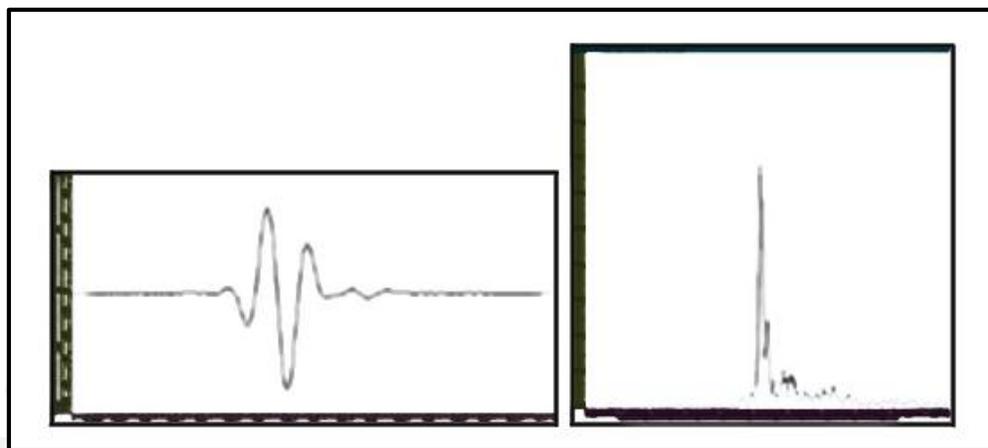


Figura 1.59 – Representación de A-scan, señal de radiofrecuencia (izquierda), señal rectificada (derecha)

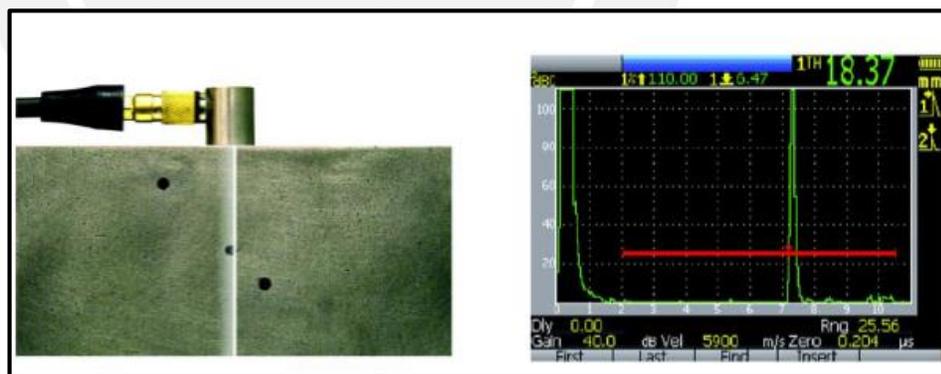


Figura 1.60 – Representación de una pieza de prueba (Izquierda) y visualización de la señal en un equipo de ultrasonido convencional

B) Visualización B-scan

El B-scan es una vista 2D, donde usualmente el eje horizontal es la posición de escaneo y el eje vertical representa el eje de recorrido o tiempo. Los ejes pueden invertirse dependiendo

del requerimiento de la pantalla. Realmente un B-scan es una serie de varios A-scan o formas de onda; es decir, están relacionados uno directamente con el otro. (Ver figura 1.61)

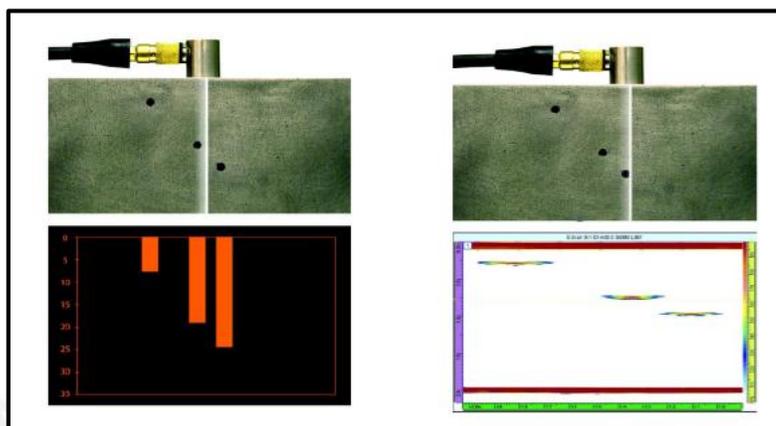


Figura 1.61 – Representación de visualización de B-Scan; ultrasonido convencional (Izquierda) y ultrasonido *Phased Array* (Derecha)

C) Visualización C-scan

Un C-scan es una vista 2D de un recorrido ultrasónico representado como una vista de planta o desde arriba de una pieza de prueba (ver figura 1.62). Uno de los ejes es el eje de escaneo; el otro, es la distancia desde el transductor a la referencia. En un sistema convencional ambos ejes son mecánicos; sin embargo, en un arreglo de fases, un eje es mecánico y el otro es electrónico. La posición de la información mostrada está relacionada directamente con la posición durante la adquisición.

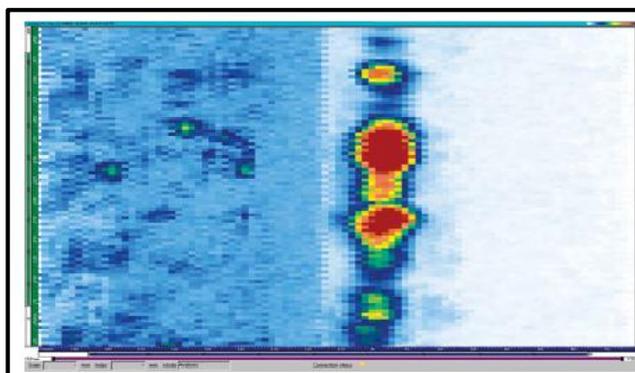


Figura 1.62 – Representación de una vista C-Scan o Vista de planta.

D) Visualización D-Scan

Un D-scan es una vista de dos dimensiones de la información recolectada, al igual que un B-scan y un C-scan. Es similar a un B-scan, pero está a 90° de este. Ambos tanto el D-scan como el B-scan garantizan mostrar solamente profundidades predefinidas. Uno de los ejes es definido como eje transversal y el otro como recorrido de ultrasonido. Finalmente podemos decir que un B-scan representa el eje de escaneo versus el tiempo; mientras que un D-scan representa el eje transversal versus el tiempo. (Ver figura 1.63)

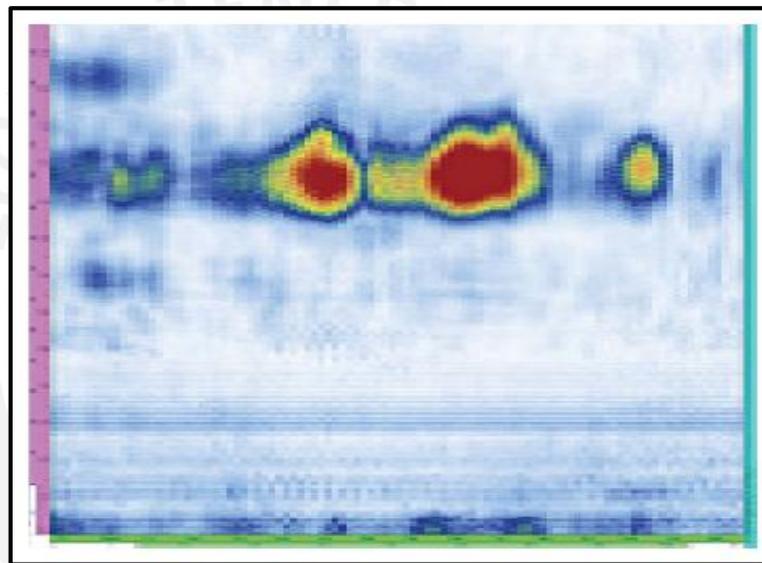


Figura 1.63 – Representación de una vista D-scan

E) Visualización S-scan

Un S-scan, llamado también sectorial, representa una imagen en dos dimensiones de todos los A-scan de un canal corregido tanto en retardo como en ángulo. Un típico S-scan reúne un rango de ángulos usando los mismos elementos y distancia focal. El eje horizontal representa la distancia proyectada desde un punto de salida del transductor y el eje vertical representa la profundidad. (Ver figura 1.64)

S-scan es único para los sistemas de arreglo de fases, puede ser usado para ondas longitudinales o transversales, de contacto o inmersión o montadas en una zapata.

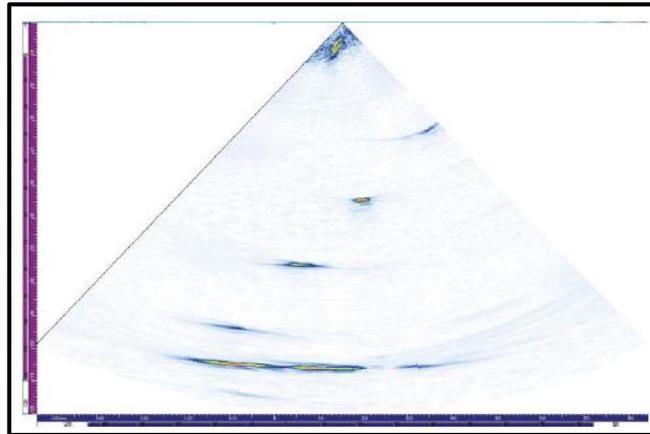


Figura 1.64 – Representación de una imagen sectorial en un arreglo de fases.

F) Visualización polar

Una vista polar es una vista en dos dimensiones, que es utilizada para la presentación en inspecciones de partes cilíndricas. Usado en conjunto con esta representación en 2D provee la ubicación de las discontinuidades. (Ver figura 1.65)

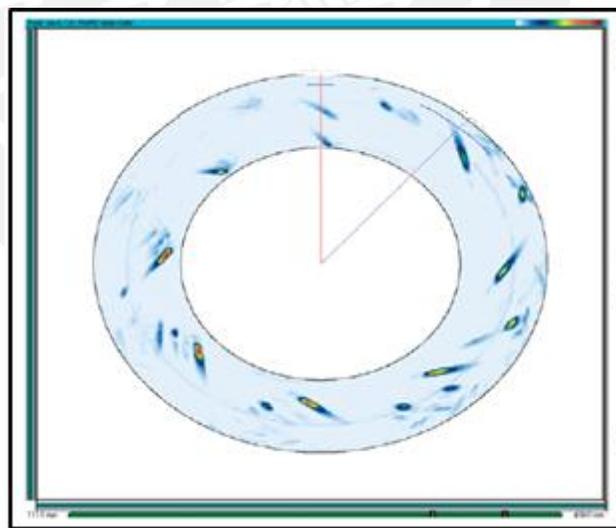


Figura 1.65 – Ejemplo de Vista Polar

1.3.3. Equipamiento

Una de las consideraciones más importantes cuando uno realiza una inspección es saber cuáles serán los elementos o componentes adecuados para poder hacer una correcta

inspección, ya que existen gran variedad de ellos; sin embargo, están diseñados para ciertos casos específicos.

Como se explicó anteriormente, los elementos básicos para una inspección por ultrasonido son:

- Equipo de ultrasonido *Phased Array* con pantalla de visualización (esto hace que no sea necesario tener una computadora)
- Transductor de ciertas características como frecuencia, cantidad de elementos, etc.
- Cable de conexión para transmisión de información
- Zapata (usado para modificar el ángulo de incidencia del transductor al material de prueba).

A continuación se explicará más acerca de las características de estos elementos básicos:

1.3.3.1. Características de un Transductor de *Phased Array*

Un arreglo es una estructura organizada de elementos de un objeto. La forma más simple de un arreglo de ultrasonido para END debe ser una serie de varios simples elementos agrupados de tal forma que incrementen el rango de inspección o la velocidad de esta.

Otra forma simple de entenderlo, es ver a un transductor de *phased array* como una serie de elementos individuales en un solo paquete. Mientras estos elementos en realidad son mucho más pequeños que los transductores convencionales, estos elementos pueden ser pulsados como un grupo de tal forma que generen un frente de onda direccionado y controlado (ver figura 1.66).



Figura 1.66 - Transductor de *Phased Array*

Los transductores de *Phased array* están diseñados en diferentes tamaños, formas, frecuencias y número de elemento; sin embargo, lo que ellos tienen en común es un elemento piezoeléctrico que ha sido dividido en gran número de segmentos. Este elemento segmentado es luego incorporado dentro de un ensamble de un transductor que incluye una capa protectora, conexiones de cable, etc. (ver figura 1.67)

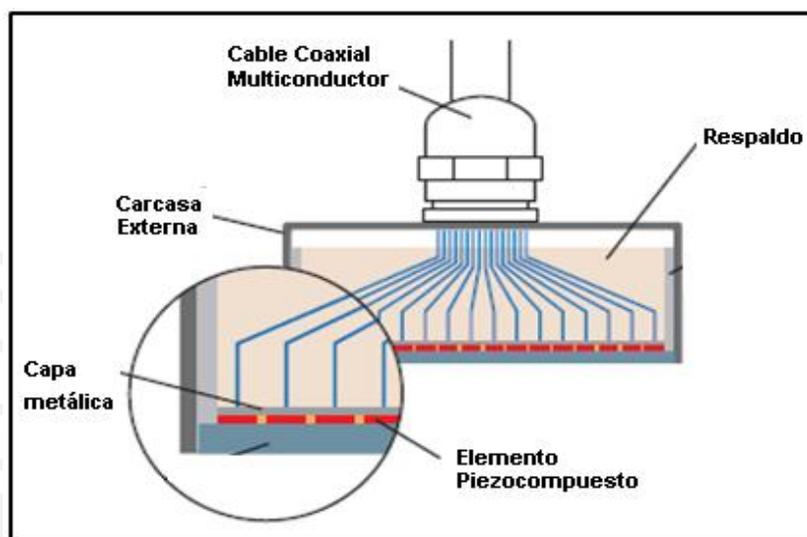


Figura 1.67 – Sección transversal del transductor de *Phased Array*

Los transductores *phased array* son categorizados funcionalmente de acuerdo a los siguientes parámetros básicos:

Tipo: La mayoría de los transductores *Phased Array* son del tipo angular, diseñados para ser usados con una zapata de plástico o con una zapata de ángulo recto. De contacto directo y de inmersión son también una división de ellos.

Frecuencia: La mayoría de los equipos de defectología trabajan entre 2MHz y 10 MHz, es por ello que la mayoría de los transductores caen dentro de ese rango. Menores y mayores frecuencias de transductores también se pueden encontrar. Como con transductores convencionales, la penetración aumenta cuando la frecuencia disminuye, mientras que la resolución nitidez focal aumenta con una mayor frecuencia.

Número de Elementos: Transductores de *Phased Array* más comunes tienen entre 16 y 128 elementos. A mayor cantidad de elementos incrementa la capacidad de focalización y direccionamiento. Lo que también incrementa el área cubierta; no obstante, tanto los instrumentos como los transductores también incrementan su costo.

Tamaño de elementos: Mientras el ancho del elemento disminuye, la capacidad de orientación de los elementos aumenta; sin embargo, mayor área cubierta requiere más elementos a un mayor costo.

Los parámetros dimensionales que definen un transductor de *Phased Array* son definidos de la siguiente forma:

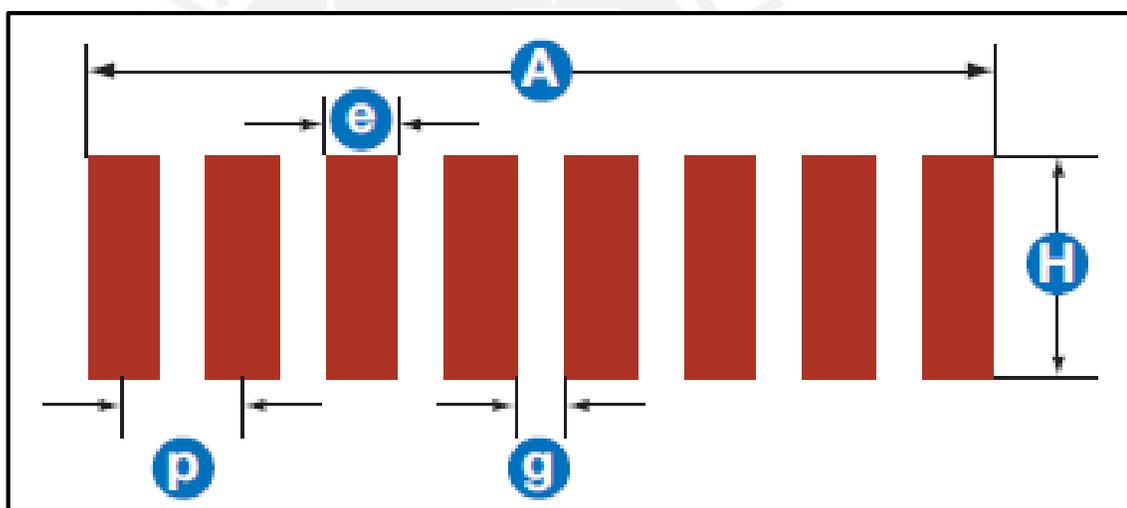


Figura 1.68 – Parámetros dimensionales de un transductor de *Phased Array*

A = Apertura total

H = Altura del elemento.

P = Separación, de centro a centro entre dos elementos sucesivos

e = ancho de un elemento individual

g = Espaciamiento entre elementos activos.

Esta información es usada por el software del instrumento para generar la forma de haz deseada. Si estos datos no son ingresados automáticamente por el reconocimiento del software, entonces deben ser ingresados manualmente durante la calibración.

1.3.3.2. Características de las zapatas en *Phased Array*

Usualmente los transductores de *Phased Array* están diseñados para trabajar con una zapata de plástico. Las zapatas son usadas tanto en ondas transversales como en longitudinales. Estas zapatas realizan prácticamente la misma función en un sistema de arreglo de fases que con un ultrasonido convencional de simple elemento, la cual es acoplar la energía sonora del transductor a la pieza de prueba de tal forma que este modo se convierta y/o se refracte al ángulo deseado de acuerdo con la ley de Snell. Mientras que los sistemas de *phased Array* utilizan el direccionamiento del haz para crear haces a múltiples ángulos desde una simple zapata, este efecto de refracción es también parte del proceso de generación del haz. Algunos transductores típicos de *Phased Array* son mostrados en la figura 1.69.



Figura 1.69 – Ejemplos de zapatas *phased Array*

1.3.4. Procedimiento de Inspección

El procedimiento básico que seguiremos para realizar este ensayo será de acuerdo a los requerimientos que se exigen en el código ASME Sección V, artículo 4, Edición 2013. Estos requerimientos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1.5 – Tablas que especifican lo que debe contener un procedimiento de inspección de acuerdo con el código ASME

Tabla V-421 Requerimientos de una examinación con escaneo Lineal por Arreglo de Fases Usando arreglos lineales		
Requerimientos (Si es que aplica)	Variable Esencial	Variable no Esencial
Unidad de Búsqueda(s) - (Separación de elementos, tamaño, número y dimensión de separación)	X	...
Rango Focal(es) - (plano de Identificación, profundidad, o recorrido del sonido cual aplique)	X	...
Tamaño(s) de Apertura Virtual - (número de elementos, ancho de elemento y altura efectiva)	X	...
Ángulo de refracción natural de la zapata	X	...
Plan de Escaneo	X	...
Punto de referencia de eje de Soldadura	...	X
Requerimientos adicionales de Escaneos tipo E		
Ángulos de Rastreo	X	...
Número de elementos de inicio y final de apertura	X	...
Cambio(s) de incrementos de Apertura - (número de Elementos Escalonados)	X	...
Requerimientos adicionales de Escaneos tipo S		
Rango Angular de Barrido	X	...
Incremento de Barrido angular (Cambio de incremento angular, grados)	X	...
Número de elementos de aperutra (primero y último)	X	...

Tabla 1.5 – Tablas que especifican lo que debe contener un procedimiento de inspección de acuerdo con el código ASME (Continuación)

Tabla T-421 REQUERIMIENTOS DE UN PROCEDIMIENTO DE EXAMINACIÓN ULTRASÓNICA		
Requerimiento	Variable Esencial	Variable No - Esencial
Configuración de Soldadura a ser examinada, incluyendo el espesor	X	...
Las superficies desde donde la examinación es realizada	X	...
Técnica(s) - (Haz recto, haz angular, contact, y/o inmersión)	X	...
Ángulo(s) y modo(s) de la propagación de la onda en el material	X	...
Tipo(s) de unidad de prueba, frecuencia(s), y tamaño(s)/forma(s) del elemento	X	...
Unidades de búsqueda especiales, zapatas, cuando sea usado	X	...
Instrumentos Ultrasónico(s)	X	...
Calibración (Bloque(s) de Calibración y Técnica(s))	X	...
Dirección y Extensión de Escaneo	X	...
Escaneo (Manual vs. Automático)	X	...
Método de discriminación geométrica de indicaciones de falla	X	...
Método para dimensionamiento de indicaciones	X	...
Programa de adquisición de datos, cuando sea usado	X	...
Escaneo Sobrepuesto (Solo decrecimiento)	X	...
Requerimientos del performance del Personal, cuando sea requerido	X	...
Requerimientos de calificación del personal	...	X
Condiciones superficiales (Examinación superficial, bloque de Calibración)	...	X
Acoplante (marca, nombre o tipo)	...	X
Post-Examinación: Técnica de Limpieza	...	X
Alarma automática y/o equipo de grabación, cuando aplique	...	X
Registros, incluyendo Información de calibración mínima a ser registrada (e.g., seteo de instrumentos)	...	X

Capítulo 2

ENSAYO DE PROBETAS MEDIANTE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL Y ULTRASONIDO DE ARREGLO DE FASES

En el presente capítulo realizaremos el ensayo de ultrasonido de arreglo de fases y lo comparemos con el ensayo de radiografía industrial; para ello, utilizaremos las mismas probetas para ambos casos. Con ello podremos ver la capacidad de detección que tienen ambas técnicas y estas serán analizadas posteriormente en el capítulo 4.

Las probetas que se analizarán son unas planchas con un espesor de 10 mm, las cuales poseen un cordón de soldadura a lo largo de uno de sus ejes. Cada una de esas probetas posee una discontinuidad en su interior, las cuales están certificadas por la empresa que las fabricó (Sonaspection).

Primero se ensayaron las probetas mediante radiografía industrial, utilizando una fuente de rayos gamma. Este ensayo fue realizado por especialistas Nivel II en esta técnica; asimismo fueron ensayadas las probetas mediante rayos X.

El segundo ensayo se realizará utilizando la técnica de ultrasonido de arreglo de fases, y se evaluarán las mismas probetas.

2.1. Ensayo de Ultrasonido de Arreglo de Fases

Este ensayo fue realizado en el laboratorio de la empresa ADEMINSAC, la cual contaba con equipos disponibles e implementos adecuados para realizar el ensayo. Básicamente el ensayo consistió en seleccionar el equipamiento adecuado y realizar la calibración del equipo para la inspección de las probetas seleccionadas.

La calibración del equipo de UTPA consiste en 3 pasos: Calibración de velocidad, calibración de retardo de la zapata (Wedge delay) y calibración de sensibilidad. Una vez calibrado el equipo se procedió a ensayar cada una de las probetas del fabricante Sonaspection. Este

fabricante emite un certificado que se encuentra en los anexos, donde se puede apreciar las características de cada una de las discontinuidades (ubicación, y tipo de discontinuidad).

2.1.1. Metodología de Ensayo

- **Análisis de probetas a ensayar:** Es importante conocer las características del componente que se va ensayar; algunas características básicas que el inspector debe conocer son las siguientes: tipo de material, proceso de soldeo, espesor a ensayar y diseño de junta (dimensiones). Estos datos serán de mucha ayuda a la hora de realizar un plan de escaneo y una inspección.
- **Selección del equipamiento y accesorios adecuados:** Una vez que se conozcan las características de las probetas a ensayar, se procede a la selección adecuada de accesorios que nos permitan desarrollar una adecuada inspección. Por ejemplo, las probetas a ensayar tienen un espesor de 10 mm, por ende nos convendría utilizar un transductor de alta frecuencia (siguiendo los principios básicos de ultrasonido).
- **Realizar el plan de escaneo:** Luego de la selección adecuada de accesorios gracias a la información obtenida previamente, nos disponemos a realizar un plan de escaneo que nos permita poder inspeccionar la unión soldada; a fin de poder detectar las discontinuidades presentes en las probetas. Siguiendo este paso obtendremos la distancia de alejamiento que debemos mantener y los ángulos de barrido para la inspección.
- **Calibración del Equipo:** Este paso es muy importante, ya que al realizar una calibración adecuada podremos obtener con exactitud las dimensiones de las discontinuidades y nos permitirá poder caracterizar y determinar de manera correcta la posición de las discontinuidades encontradas.
- **Inspección de probetas:** Finalmente realizaremos la inspección de las probetas calificadas, buscando poder determinar todas las discontinuidades que en ellas se encuentran.

2.2. Equipamiento a utilizar para el ensayo

- EQUIPO DE ULTRASONIDO *PHASED ARRAY* (ver figura 2.1)

Marca: SONATEST

Modelo: Veo 16:64 Elementos



Figura 2.1 – Equipo de *Phased Array*, modelo VEO 16:64

- TRANSDUCTOR DE *PHASED ARRAY* (ver figura 2.2)

T1-PE-5.0M32E0.8P

Frecuencia: 5 MHz

N° de Elementos: 32

Separación entre elementos (Pitch): 0.8



Figura 2.2 – Transdutor de Phased Array de 32 elementos

- **ZAPATA DE PHASED ARRAY** (ver figura 2.3)
T1-37WOD-REXO
Angulo de la Zapata: 37°



Figura 2.3 – Zapata a utilizar en el ensayo de UTPA

- **CABLE I-PEX** (ver figura 2.4)
Marca: Sonatest



Figura 2.4 – Cable I-PEX

- **PATRÓN DE CALIBRACIÓN** (ver figura 2.5)

Modelo: IIW - Tipo 1

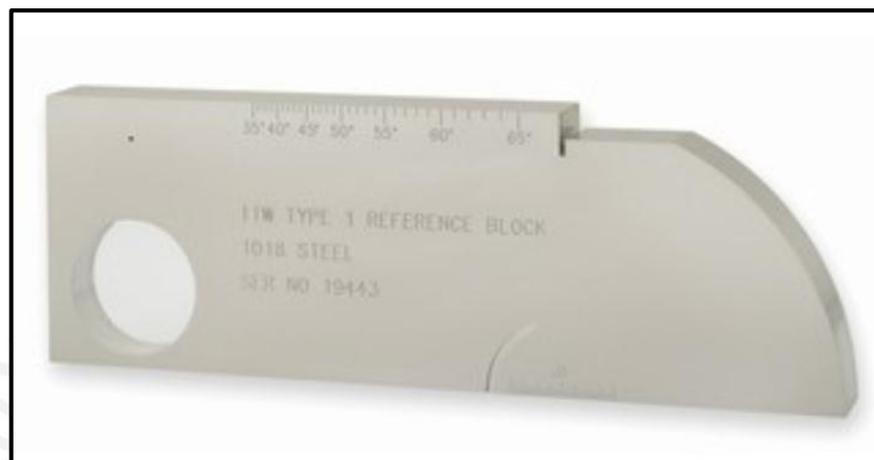


Figura 2.5 – Imagen del Patrón de calibración a utilizar en el ensayo.

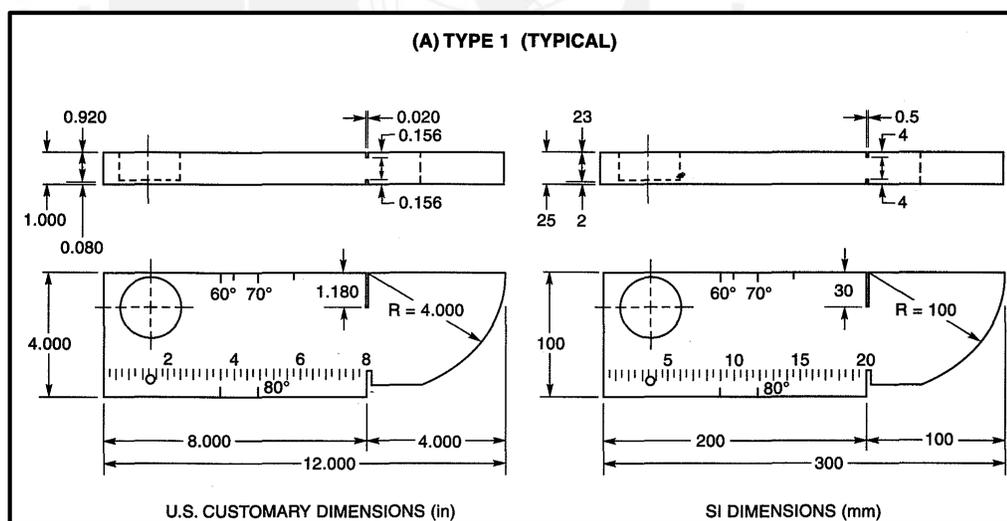


Figura 2.6 – Dimensiones estandarizadas en el bloque IIW

- **GEL ACOPLANTE** (ver figura 2.7)

Marca: Sonotech

Este será utilizado para el adecuado acople entre la zapata y la piezas de prueba.



Figura 2.7 – Gel acoplante a utilizar en los ensayos

2.2.1. Calibración del Equipo

Una vez que tenemos todos los implementos, procedemos a realizar la calibración de nuestro equipo de Phased Array. Realizamos las conexiones correspondientes; es decir, conectamos el cable I-PEX al transductor o cristales. Seguido de ello procedemos a ensamblar el transductor con la zapata a utilizar, para ello colocamos un poco de gel o grasa de tal forma que mejore el acoplamiento entre zapata y transductor. Finalmente conectamos el otro terminal del cable I-PEX a la conexión en el Equipo.

Una vez que el equipo y los instrumentos ya están listos se procede a realizar la calibración del equipo. Existen 4 parámetros básicos que uno debe calibrar en un equipo de Phased Array y estos son:

- Calibración de Velocidad
- Calibración del retardo de Zapata (Wedge Delay)
- Calibración de Sensibilidad
- Criterio de Aceptación (Curva DAC, TVG, TGC, etc.)

Para poder realizar todas estas calibraciones utilizaremos un patrón de calibración, el cual es el IIW. (Ver figura 2.8)

2.2.2. Calibración de Velocidad

Como sabemos cada material posee una velocidad inherente a él, existen gran cantidad de tablas donde se muestra la velocidad del sonido para cada material; sin embargo, siempre debemos calibrar la velocidad ya que como sabemos existen gran variedad de aceros, es por ello que la velocidad en cada uno puede ir variando. Actualmente los equipos avanzados poseen la opción de auto calibración; es decir, esto consiste en que nosotros ingresamos dos referencias (distancias conocidas) al equipo y luego con ayuda del bloque de calibración y el transductor buscamos esas referencias; con ello aseguramos que el equipo corrija la velocidad del material y mida con mucha precisión las indicaciones que pueda haber. (ver figura 2.9 y 2.10)

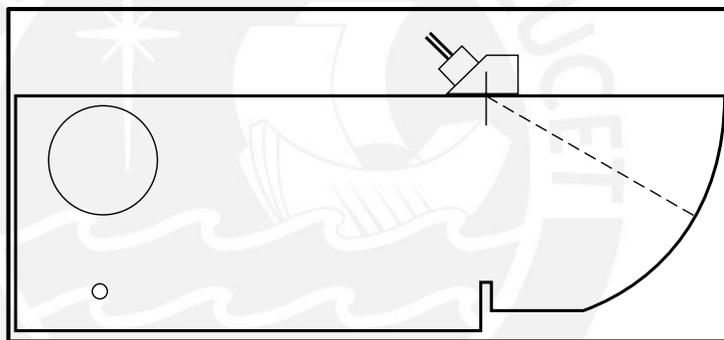


Figura 2.8 – Rango de Disparo en un bloque IIW (Calibración de Distancia velocidad)

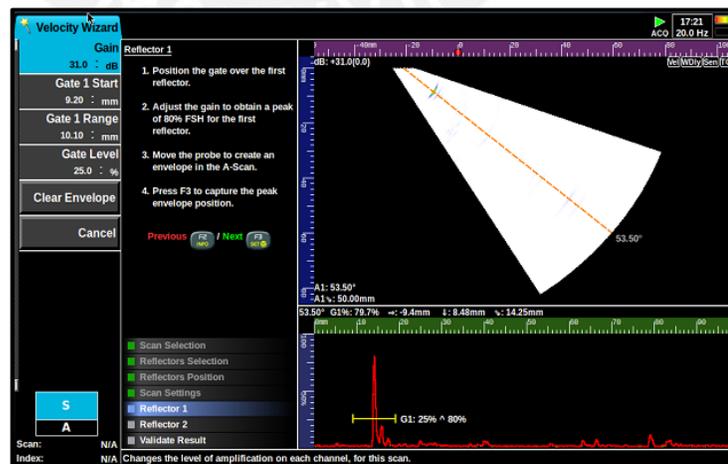


Figura 2.9 – Calibración del reflector 1, con una distancia de 100 mm de recorrido sónico

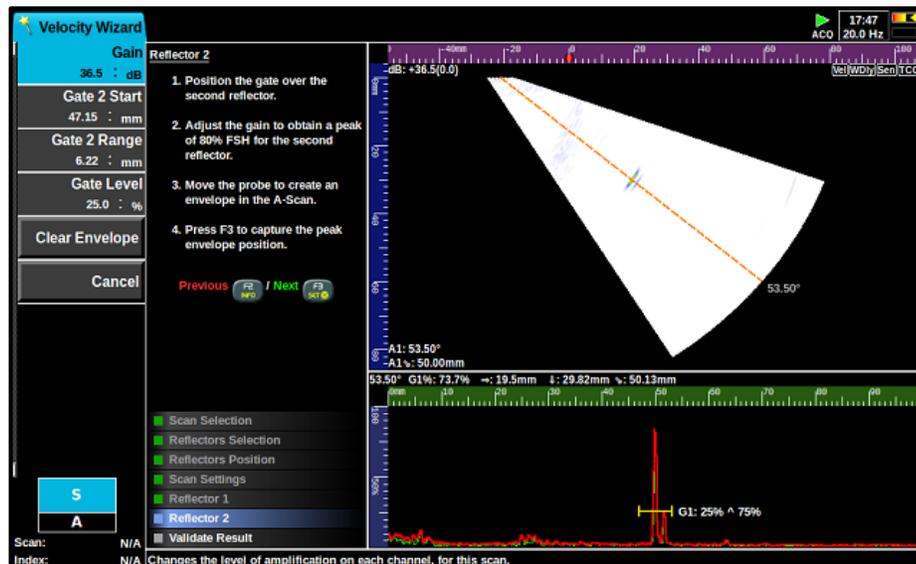


Figura 2.10 – Calibración del reflector 2, con una distancia de 200 mm de recorrido sónico

2.2.3. Calibración del Retardo de la Zapata (Wedge Delay)

La calibración del retardo de la zapata tiene como objetivo poder compensar la variación del recorrido del sonido en la zapata. Esta calibración asegura que las indicaciones sean visualizadas a la profundidad correcta. (Ver figura 2.11 y 2.12)

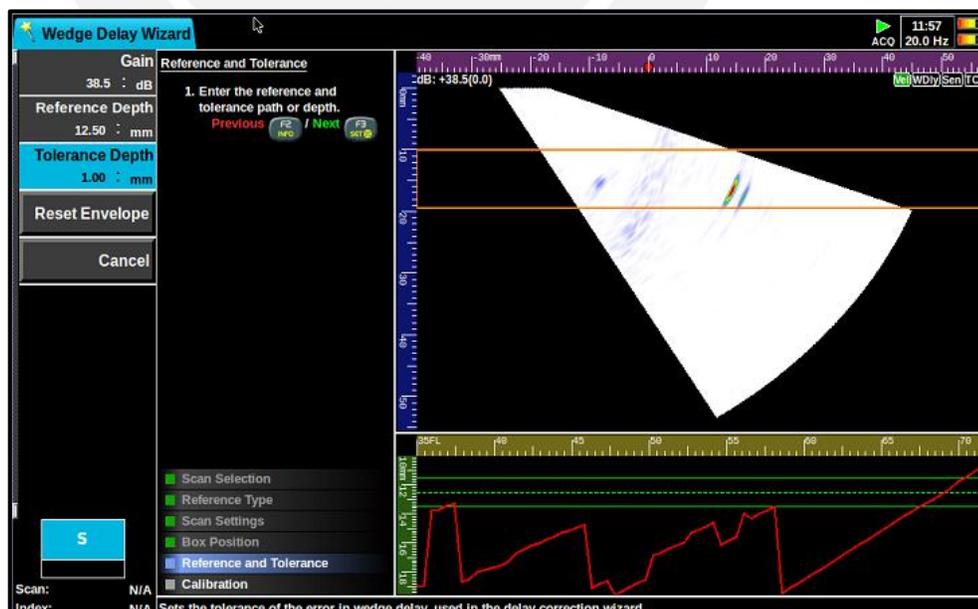


Figura 2.11 – Visualización del Retardo de zapata antes de la calibración

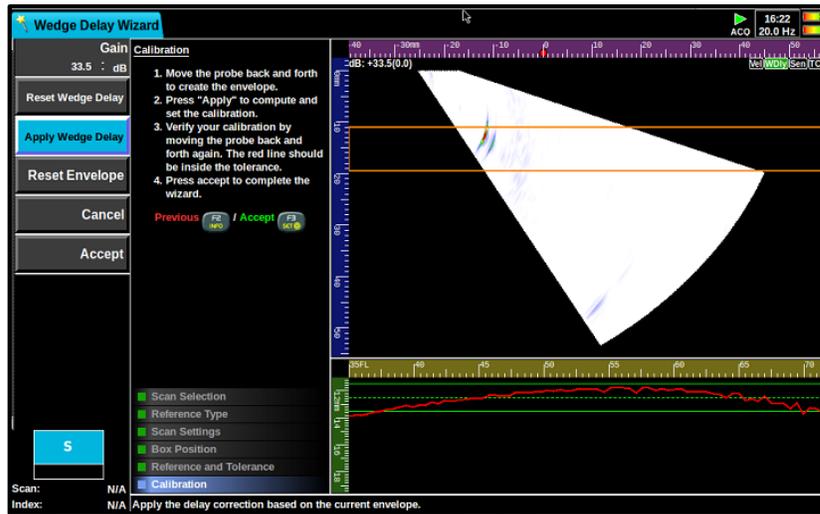


Figura 2.12 – Corrección del retardo de zapata.

2.2.4. Calibración de Sensibilidad

La calibración de sensibilidad tiene por objetivo compensar la atenuación del sonido debido a la zapata y la variación del ángulo en el barrido sectorial. La calibración asegura una amplitud de respuesta uniforme para cada ley focal para un cierto reflector. También es conocida como AGC (Angular *Corrected Gain* o Corrección de ganancia angular). (Ver figura 2.13 y 2.14)

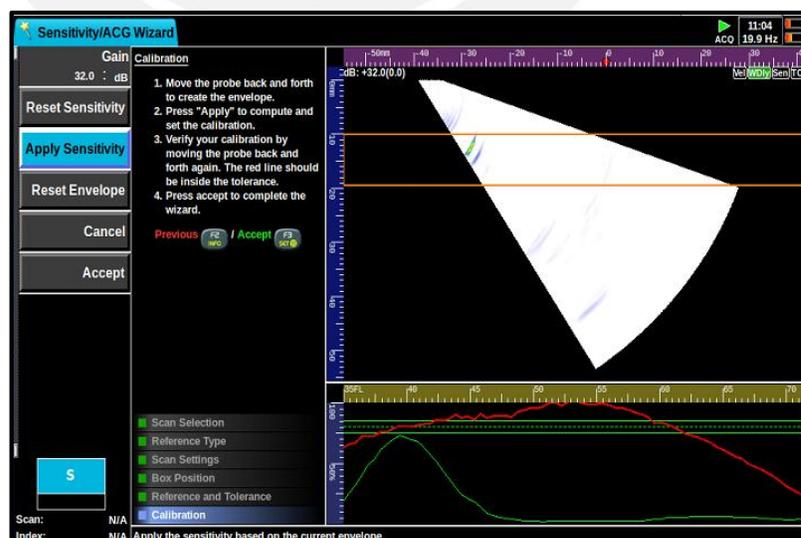


Figura 2.13 – Curva de amplitud para diferentes ángulos antes de la corrección de sensibilidad

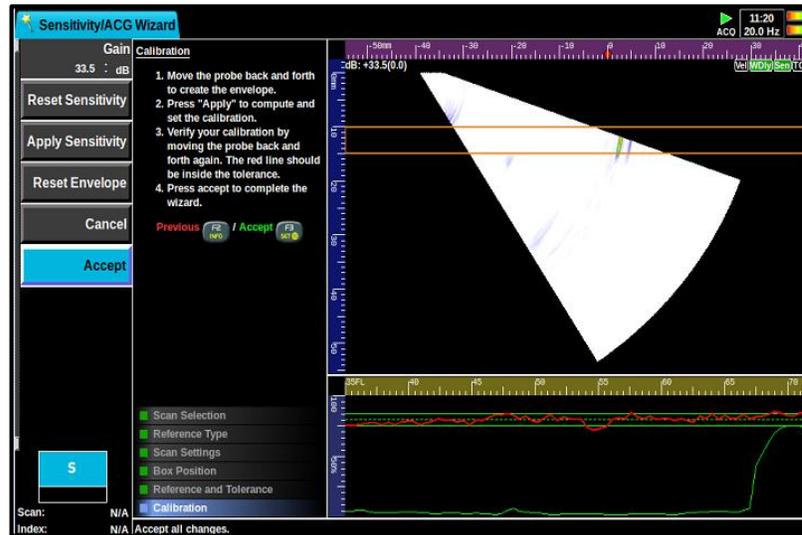


Figura 2.14 – Curva de amplitud luego de la corrección de sensibilidad.

Luego de haber calibrado velocidad, retardo de zapata y sensibilidad, el equipo ya se encuentra perfectamente calibrado para realizar el ensayo.

2.2.5. Ensayo de Probeta 1

El procedimiento que se siguió para ensayar las probetas fue colocar un poco de gel acoplante en la probeta y luego comenzar con el escaneo del cordón de soldadura. En un ensayo de arreglo de fases a diferencia de uno de UT- convencional es que el rastreo es en línea recta (ver figura 2.16), mientras que en el otro caso debe trabajarse en zigzag (ver figura 2.15).

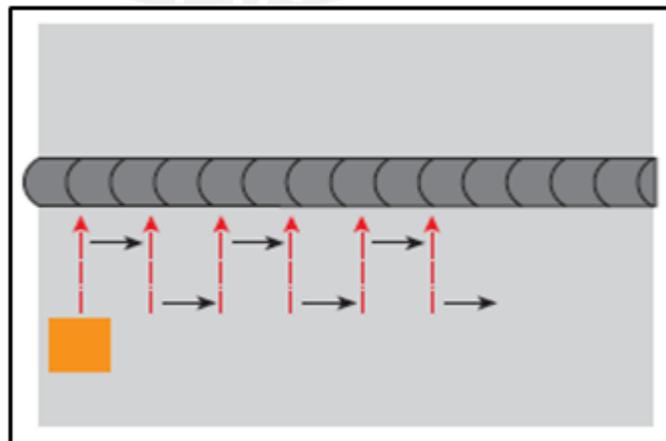


Figura 2.15 – Escaneo convencional

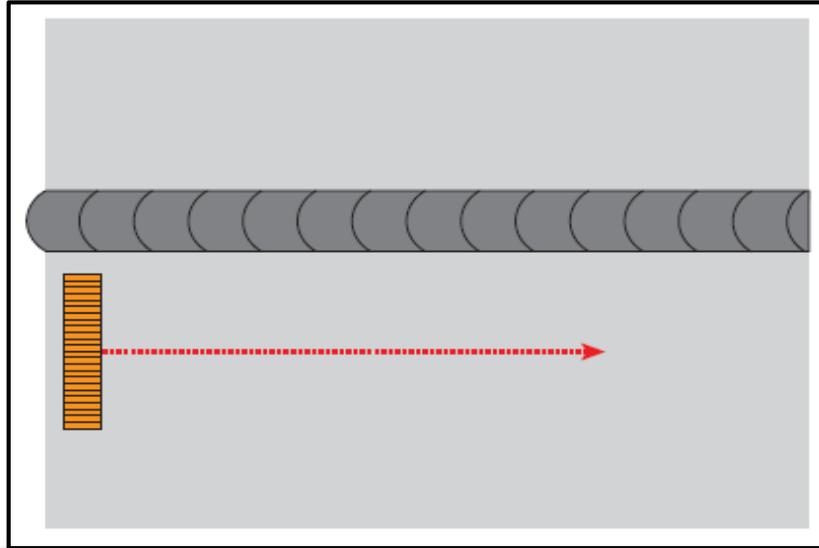


Figura 2.16 – Escaneo utilizando un transductor de Múltiples Elementos.



Figura 2.17 – Ensayo de probeta Mediante UTPA

Capítulo 3

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYO DE PROBETAS MEDIANTE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL Y ULTRASONIDO DE ARREGLO DE FASES

En el presente capítulo revisaremos los resultados obtenidos mediante el ensayo de ultrasonido Phased Array y el ensayo de radiografía industrial. En el caso de ultrasonido, utilizaremos las diferentes vistas de inspección tal como el escaneo sectorial y la compararemos con la vista dada por el fabricante Sonaspection; asimismo, se utilizó una vista del tipo C-scan (Vista de planta) para compararla con una placa radiográfica. Los resultados serán presentados en una tabla en la cual se mostrarán no solo las vistas de inspección, sino también los datos obtenidos mediante el ensayo de ultrasonido y estos serán contrastados con los del fabricante.

El estudio del POD (Probabilidad de Detección) en los ensayos no destructivos, es uno de los que más se viene impulsando en esta industria. Y se sabe que las empresas vienen invirtiendo gran cantidad de dinero en estos estudios debido a que el POD está fuertemente conectado al tema de la valoración de riesgo y análisis probabilísticos en la integridad de componentes. La probabilidad de falla (POF) es calculada a partir de parámetros estadísticos y uno de los que más influencia tiene es el POD. Actualmente, estos estudios tienen gran aplicación en plantas nucleares.

En los resultados que se muestran a continuación se verá la posibilidad de detección que tiene el UTPA de algunos tipos de defectos en soldaduras a tope.

3.1.- Resultados del Ensayo de las Probetas

Luego de realizado el Ensayo se procedió a marcar la indicación en la probeta, indicando en ella su ubicación y dimensiones (tanto profundidad como longitud). Para el dimensionamiento de la discontinuidad se utilizó la técnica de los 6 dB, que determina que

el inicio o el final de la discontinuidad es cuando la señal de la amplitud recibida cae a la mitad de la máxima amplitud de dicha discontinuidad.

3.1.1. Probeta 1 (Código N°1)

Luego de analizar mediante ultrasonido *Phased Array* la probeta N°1, se pudo observar en la zona de la discontinuidad las siguientes señales en la vista sectorial. (Ver figura 3.1)

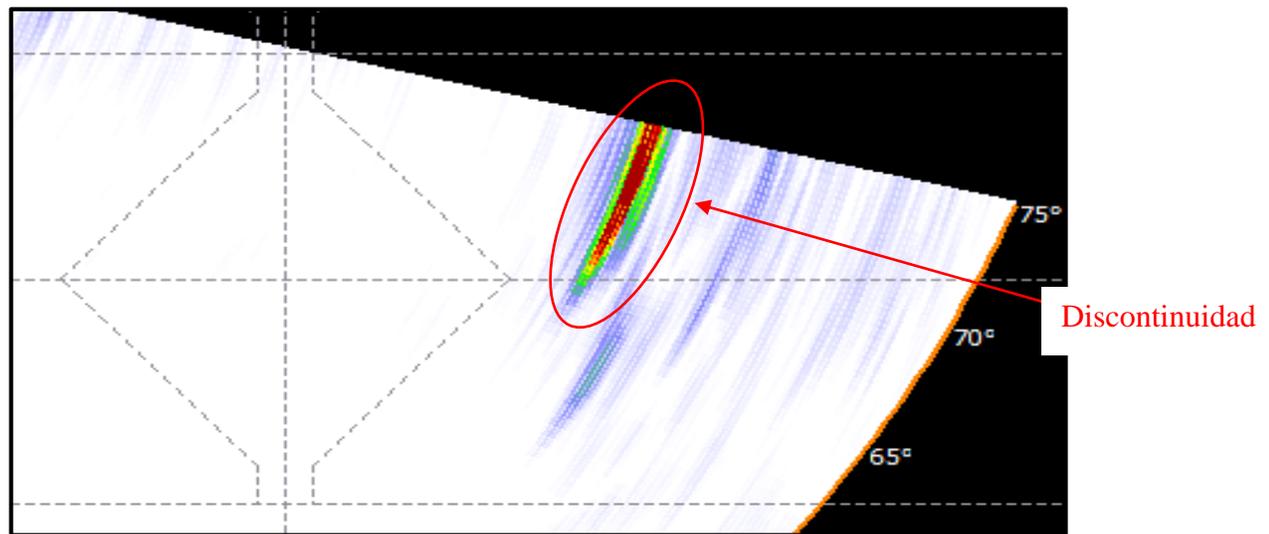


Figura 3.1 – Vista Sectorial de la discontinuidad encontrada en la probeta N°1

Tabla 3.1 – Resultados de Probeta N°1

Tabla de Resultados	Ensayo UTPA	
	Longitud	Profundidad
Probeta 1	24.5 mm	0 - 5.2 mm

En la imagen sectorial, se puede apreciar que la indicación se marca fuera del cordón de soldadura; es decir, se encuentra en el metal base. Debido a la amplitud de la señal y la ubicación de la señal se puede afirmar que la discontinuidad referida es una fisura (crack) abierta a la superficie. Si se aplicase una técnica superficial tal como líquidos penetrantes o

partículas magnéticas, deberíamos ser capaces de apreciar esta discontinuidad. En la figura 3.2 se puede apreciar donde está ubicada la discontinuidad sobre la probeta. (Ver tabla 3.1)

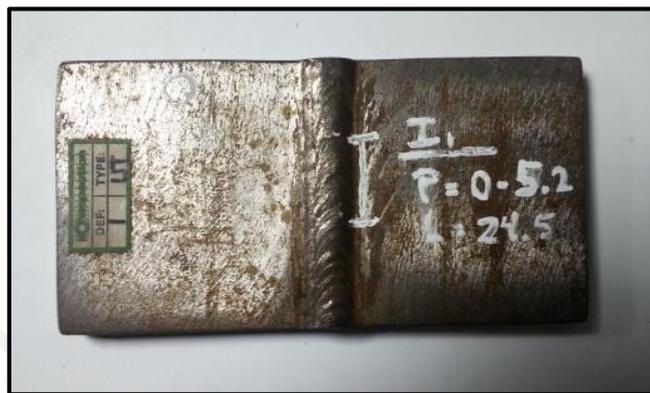


Figura 3.2 – Marcado de Indicación en la probeta N° 1.

3.1.2. Probeta 2 (Código N°2)

Al igual que en el caso de la probeta N°1, se realizó el ensayo de UTPA, y se obtuvo la siguiente imagen de la vista sectorial (ver figura 3.3), en la cual se puede apreciar una señal de amplitud muy alta en una zona adyacente a la raíz del cordón de soldadura.

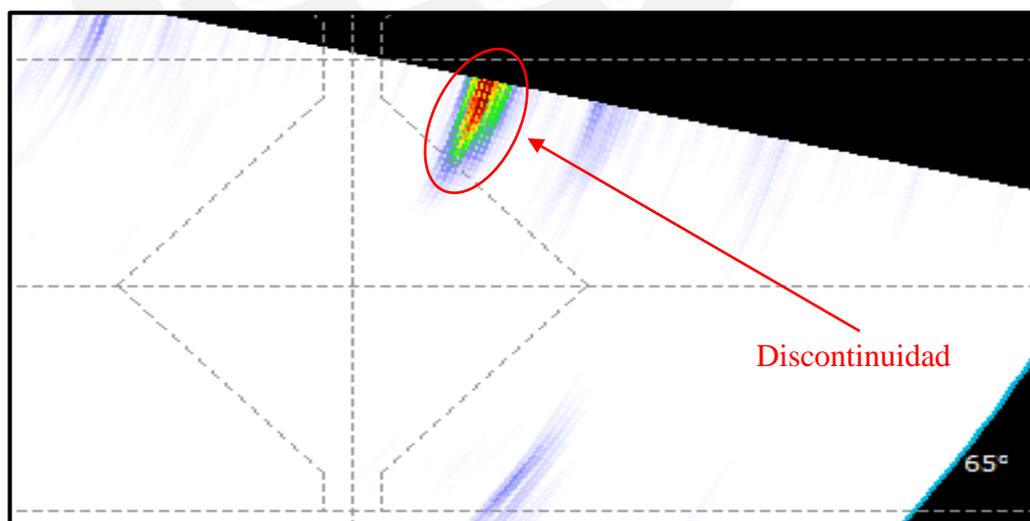


Figura 3.3 – Vista Sectorial de la discontinuidad encontrada en la probeta N°2

Tabla 3.2 – Resultados de Probeta N°2

Tabla de Resultados	Ensayo UTPA	
	Longitud	Profundidad
Probeta 2	23 mm	6 - 10 mm

Como se indicó antes, la vista sectorial (ver figura 3.3) muestra una discontinuidad adyacente a la raíz del cordón de soldadura, la cual debido a la amplitud y ubicación de la discontinuidad (ver figura 3.4) tiene las características a una fisura (Crack). (Ver Tabla 3.2)

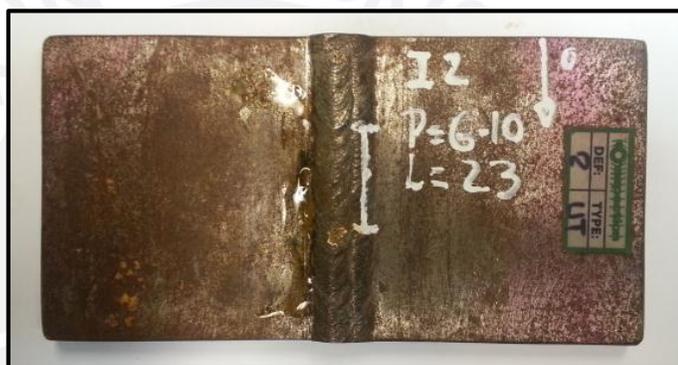


Figura 3.4 – Marcado de Indicación en la probeta N°2.

3.1.3. Probeta 3 (Código N°5)

Al igual que las probetas anteriores se puede apreciar en la imagen sectorial del ensayo de UTPA, una discontinuidad presente justo en el centro del cordón de soldadura con una amplitud alta. (Ver figura 3.5)

Se puede apreciar en la vista sectorial y por los datos obtenidos mediante el ultrasonido que es una discontinuidad volumétrica; es decir, no se encuentra abierta a la superficie. Por ello si aplicásemos algún método superficial no podríamos apreciar la discontinuidad. Al igual que en las probetas anteriores se tiene una señal de amplitud alta, y debido a la ubicación de la misma podría decirse que también es una fisura (Crack). (Ver tabla 3.3)

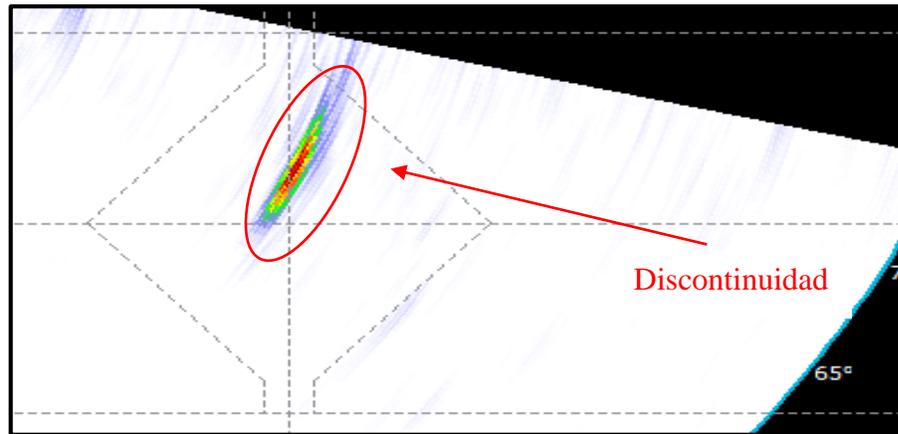


Figura 3.5 – Vista Sectorial de la discontinuidad encontrada en la probeta N°5

Tabla 3.3 – Resultados de Probeta N°5

Tabla de Resultados	Ensayo UTPA	
	Longitud	Profundidad
Probeta 5	24 mm	1 - 6 mm



Figura 3.6 – Marcado de Indicación en la probeta N°5.

3.1.4. Probeta 4 (Código N°6)

En la probeta ensayada 4 (código N°6 de Sonaspection) se puede apreciar que la vista sectorial (ver figura 3.7) presenta gran cantidad de señales, las cuales deberemos discriminar para determinar cuáles son indicaciones reales y cuales son indicaciones falsas.

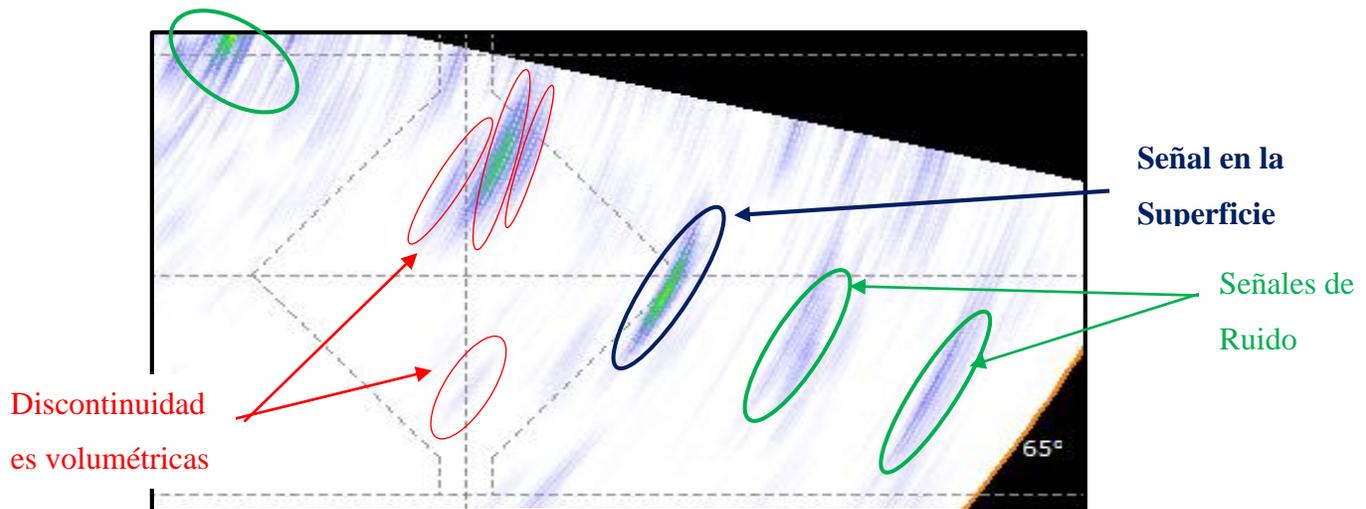


Figura 3.7 – Vista Sectorial de la discontinuidad encontrada en la probeta N°6

Tabla 3.4 – Resultados de Probeta N°6

Tabla de Resultados	Ensayo UTPA	
	Longitud	Profundidad
Probeta 6	21 mm	2- 5 mm

Como se puede observar en este caso, no es tan sencillo discriminar las indicaciones reales, a las indicaciones falsas; debido al ruido que se presenta en la imagen sectorial. Como se aprecia con la ayuda de colores se ha intentado diferenciar las señales más relevantes en esta vista. Las señales que se encuentran encerradas de color verde son señales de ruido, o indicaciones falsas que en realidad no deben afectar nuestra inspección. Asimismo se puede apreciar una señal encerrada de color azul, esta señal se recibe desde la superficie; es decir, puede ser aparentemente debido a una socavación presente en la superficie del cordón. Por último, las señales que se encuentran encerradas de color rojo, se encuentran presentes dentro del cordón de soldadura; así también, se puede apreciar que son varias señales de amplitud baja que aparecen y desaparecen a lo largo de la indicación. Por ello se puede concluir que la indicación encontrada es un conjunto de poros. (ver figura 3.8)

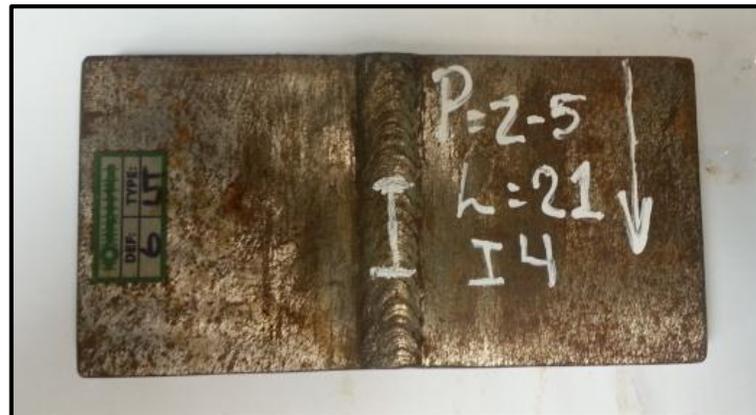


Figura 3.8 - Marcado de Indicación en la probeta N°6.

3.1.5. Probeta 5 (Código N°7)

En la probeta ensayada 5 (código N°7 de Sonaspection) se puede apreciar que la vista sectorial (ver figura 3.9) presenta una señal, la cual muestra una discontinuidad en el centro del cordón.

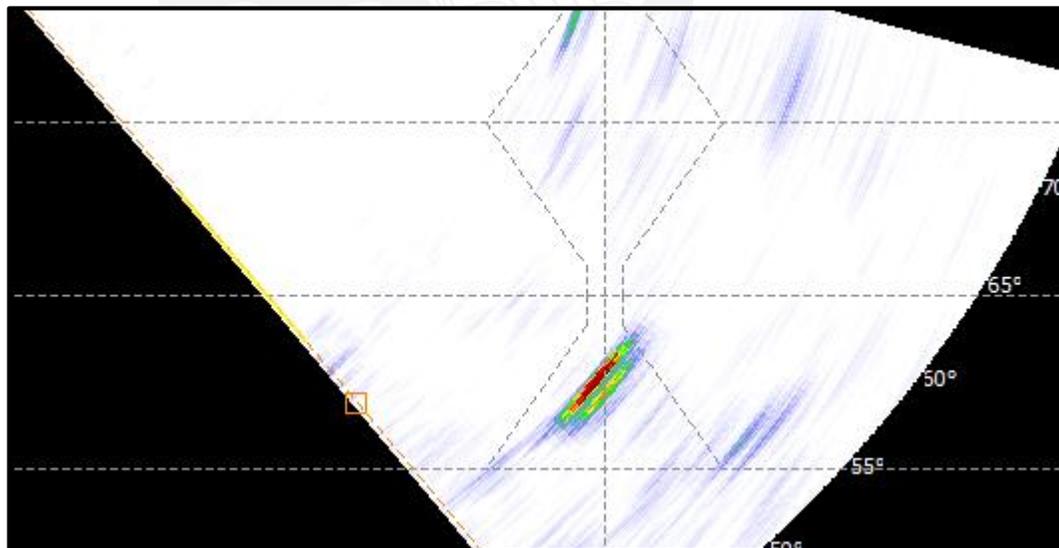


Figura 3.9 – Vista Sectorial de la discontinuidad encontrada en la probeta N°7

Tabla 3.5 – Resultados de Probeta N°7

Tabla de Resultados	Ensayo UTPA	
	Longitud	Profundidad
Probeta 7	23 mm	4 - 6 mm

Como se indicó la discontinuidad se encuentra en el centro del cordón por lo que se presume que por su ubicación, sea una discontinuidad de inclusión de escoria a una profundidad de 4 a 6 mm. (Ver figura 3.10)



Figura 3.10 - Marcado de Indicación en la probeta N°7

3.1.6. Probeta 6 (Código N°8)

A diferencia de la probeta 4, aquí podemos apreciar una imagen sectorial limpia; es decir libre de ruido y donde las discontinuidades son más fáciles de observar y discriminar. A continuación se puede apreciar la imagen sectorial del ensayo realizado a la probeta N°8. (Ver figura 3.11)

Se puede apreciar que la discontinuidad encontrada en la probeta N°8 se encuentra ubicada en el bisel del cordón de soldadura; asimismo, se aprecia que la amplitud que posee es alta. Por estas características se puede afirmar que la discontinuidad encontrada en esta probeta es una falta de fusión. En la figura 3.12 se ha marcado la zona donde está presente esta discontinuidad.

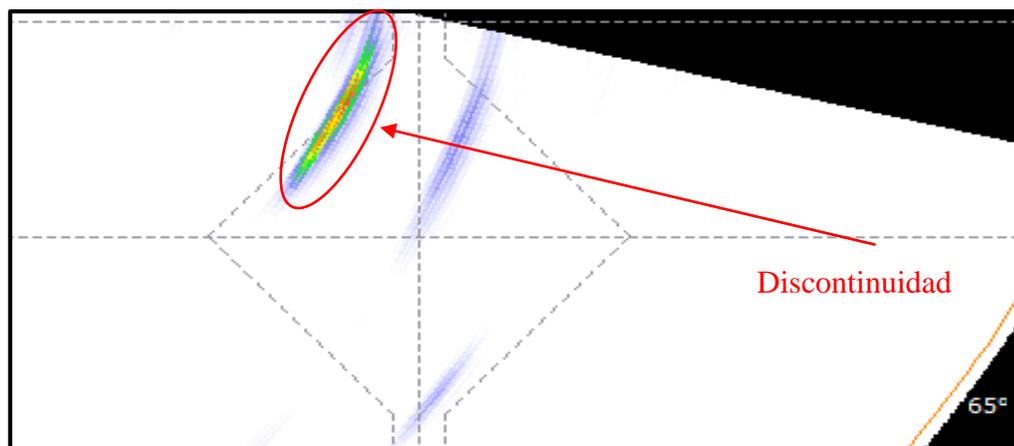


Figura 3.11 – Vista Sectorial de la discontinuidad encontrada en la probeta N°8

Tabla 3.6 – Resultados de Probeta N°8

Tabla de Resultados	Ensayo UTPA	
	Longitud	Profundidad
Probeta 8	24 mm	3 - 8 mm



Figura 3.12 - Marcado de Indicación en la probeta N°8

3.1.7. Probeta 7 (Código N°11)

Se presenta a continuación la imagen sectorial (S-scan) de la penúltima probeta ensayada.
(Ver figura 3.13)

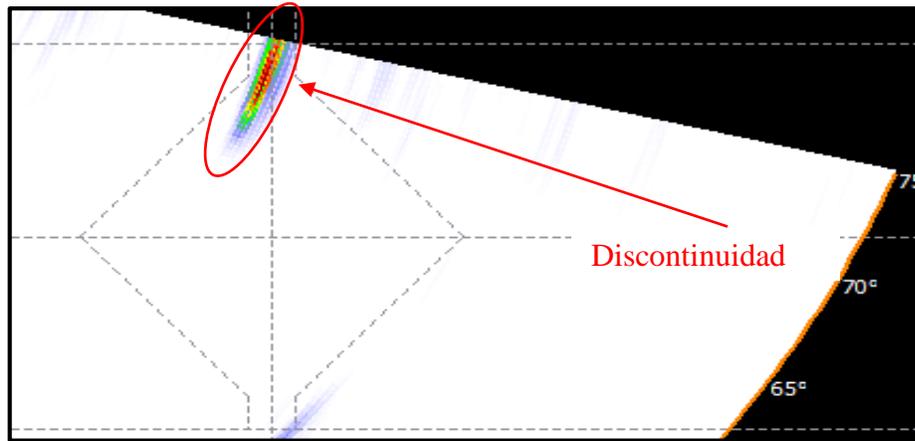


Figura 3.13 – Vista Sectorial de la discontinuidad encontrada en la probeta N°11

Tabla 3.7 – Resultados de Probeta N°11

Tabla de Resultados	Ensayo UTPA	
	Longitud	Profundidad
Probeta 11	27 mm	6 - 10 mm

Se observa en la imagen sectorial, que la discontinuidad se encuentra justo en el centro del cordón, así también se aprecia que la profundidad que indica el ensayo es en la raíz del cordón de soldadura. Debido a estas características se puede afirmar que estamos ante una falta de penetración. En la figura 3.8 se ha marcado la zona donde está presente esta discontinuidad.



Figura 3.8- Marcado de Indicación en la probeta N°11

3.1.8. Probeta 8 (Código N° 13)

La última probeta a ensayar se diferencia en algo a las anteriores, y es que el diseño de junta es en doble “V”, este diseño fue modificado en la configuración de la junta del equipo. Donde se puede apreciar una imagen con diversas señales presentes en el cordón de soldadura. (Ver figura 3.15)

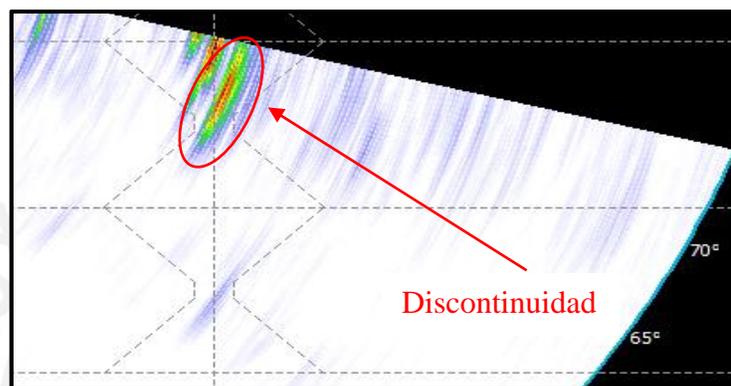


Figura 3.15 – Vista Sectorial de la discontinuidad encontrada en la probeta N°13

Tabla 3.8 – Resultados de Probeta N°8

Tabla de Resultados	Ensayo UTPA	
	Longitud	Profundidad
Probeta 13	24 mm	4 - 6 mm

Se puede apreciar dos señales intensas en la imagen sectorial (S-scan); una proveniente del centro del cordón y la otra indica que se encuentra en la parte inferior del cordón de soldadura.

De esta imagen se puede concluir que existe un defecto en el centro del cordón y que probablemente la parte inferior del cordón tenga un acabado irregular, que estaría dando esa indicación falsa en la superficie del cordón. Sin embargo, es difícil decir que tipo de discontinuidad es la que se encuentra presente en el centro del cordón.

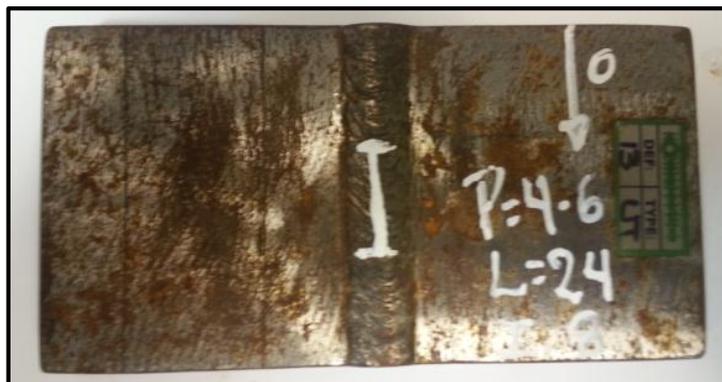


Figura 3.16 - Marcado de Indicación en la probeta N°13

Finalmente, luego del ensayo realizado a cada una de las probetas se mostrará un cuadro comparativo sobre los datos obtenidos mediante el ensayo de UTPA y los datos que otorga el fabricante Sonaspection. Así también se mostrará y comparará la vista de corte otorgada por el fabricante y la obtenida mediante el ensayo de UTPA.

Tabla 3.9 – Tabla comparativa entre el ensayo de UTPA y datos del Fabricante (Sonaspection)

Tabla de Resultados	Ensayo UTPA		Sonaspection	
	Longitud	Profundidad	Longitud	Posición
Probeta 1	24.5 mm	0 - 5.2 mm	25 mm	Central
Probeta 2	23 mm	6 - 10 mm	25 mm	Central
Probeta 5	24 mm	1 - 6 mm	25 mm	Central
Probeta 6	21 mm	2 - 5 mm	25 mm	Central
Probeta 7	23 mm	4 - 6 mm	25 mm	Central
Probeta 8	24 mm	3 - 8 mm	25 mm	Central
Probeta 11	27 mm	6 - 10 mm	25 mm	Central
Probeta 13	24 mm	4 - 6 mm	25 mm	Central

Tabla 3.10 – Tabla Comparativa muestra Imagen del fabricante, imagen sectorial, vista C-Scan (Vista de planta) de probetas N°1, 2, 5 y 6

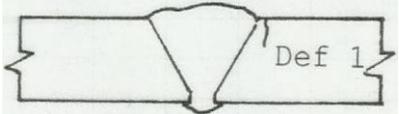
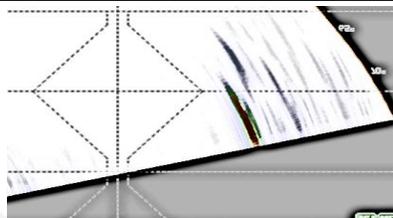
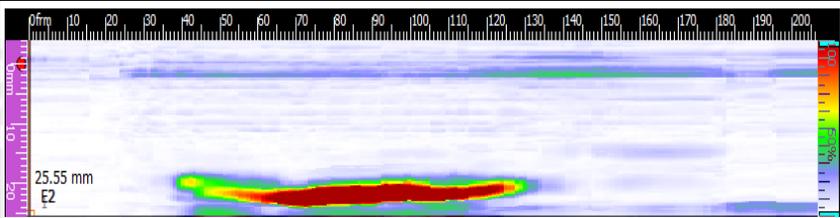
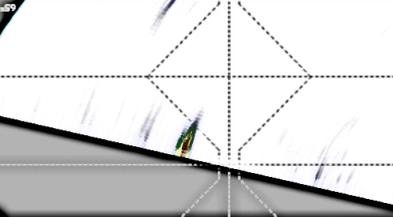
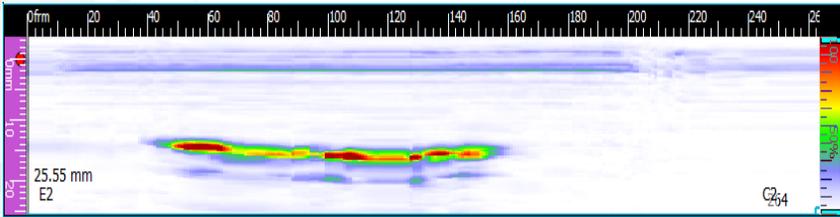
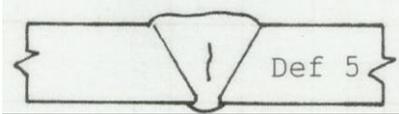
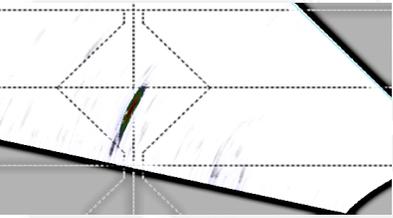
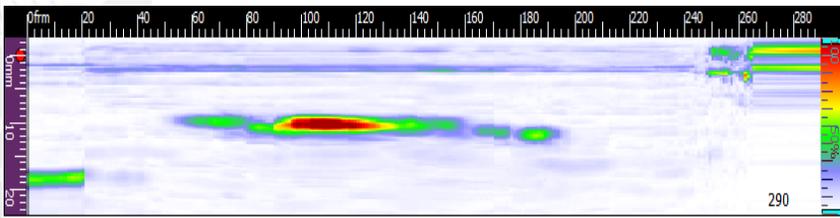
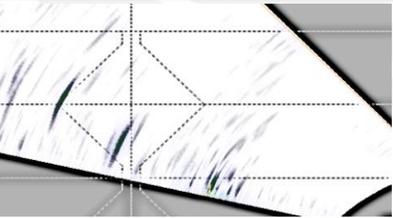
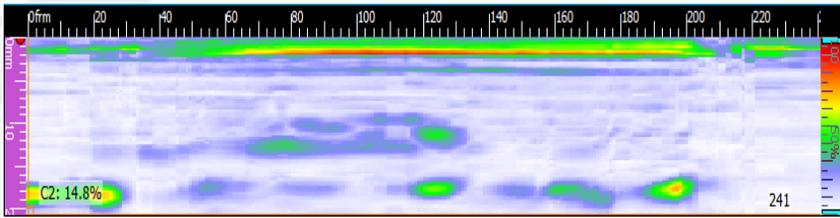
	RESULTADO DE LAS PROBETAS SEGÚN EL FABRICANTE SONASPECTION	PHASED ARRAY - UT STUDIO VIEWER - ZOOM	VISTA C-SCAN (PLACA)
PROBETA N°1			
PROBETA N°2			
PROBETA N°5			
PROBETA N°6			

Tabla 3.11 - Tabla Comparativa muestra Imagen del fabricante, imagen sectorial, vista C-Scan (Vista de planta) de probetas N°7, 8, 11 y 13

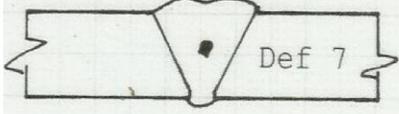
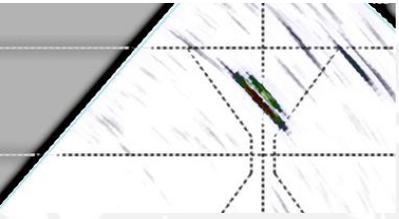
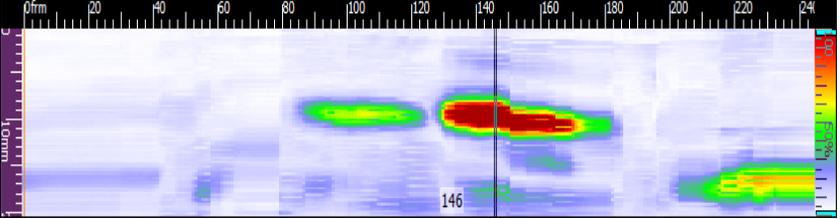
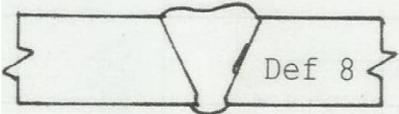
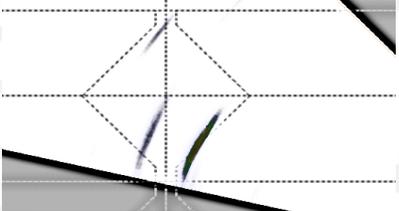
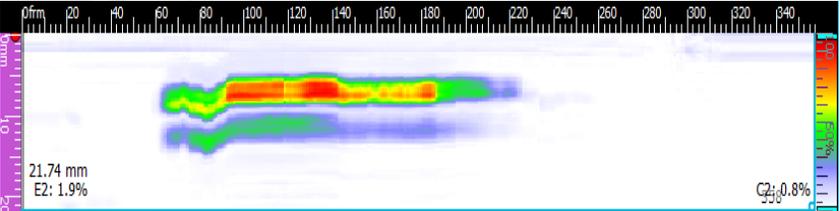
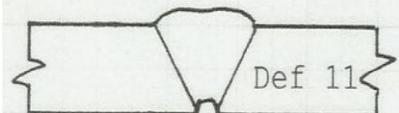
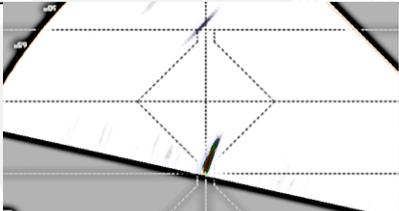
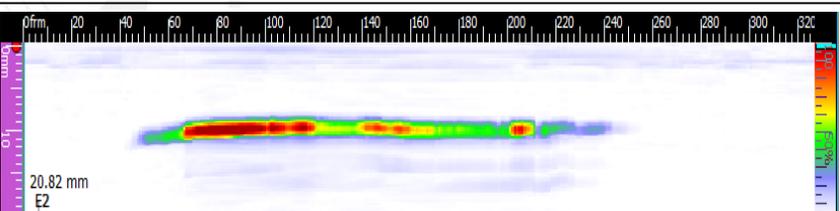
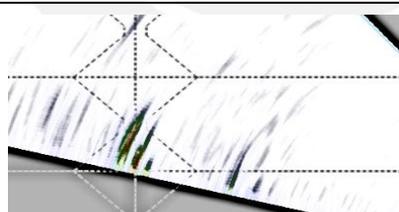
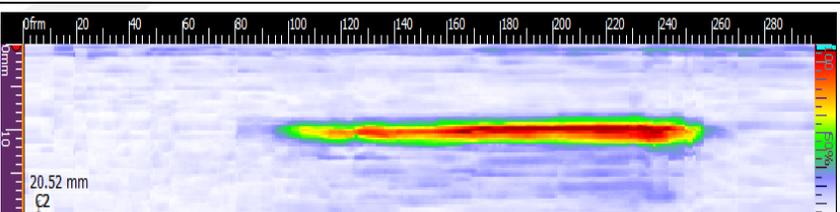
	RESULTADO DE LAS PROBETAS SEGÚN EL FABRICANTE SONASPECTION	PHASED ARRAY - UT STUDIO VIEWER - ZOOM	VISTA C-SCAN (PLACA)
PROBETA N°7			
PROBETA N°8			
PROBETA N°11			
PROBETA N°13			

Tabla 3.12 - Tabla Comparativa muestra una imagen C-Scan, placa radiográfica por RX y placa radiográfica por rayos gamma de probetas N°1, 2, 5 y 6

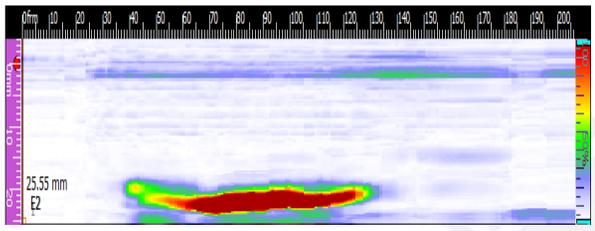
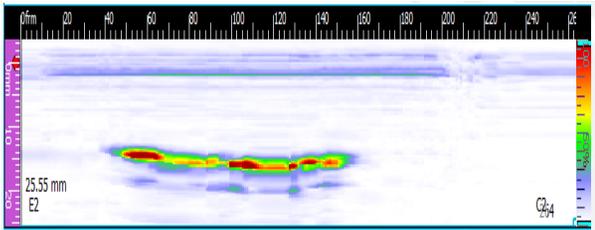
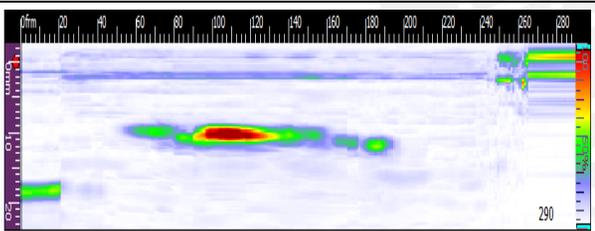
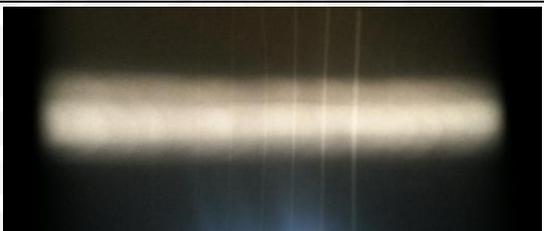
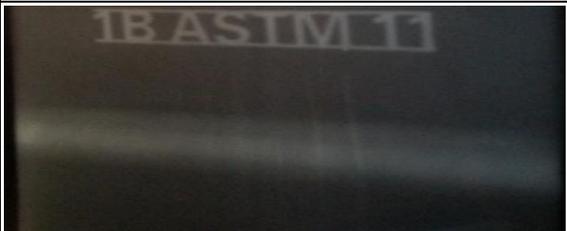
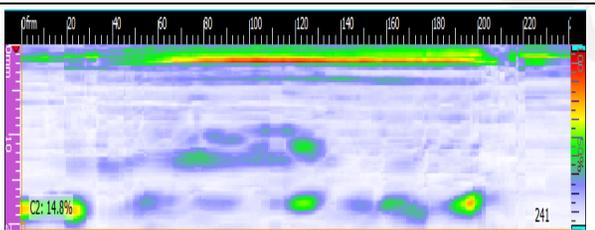
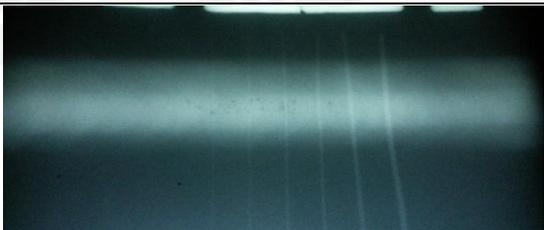
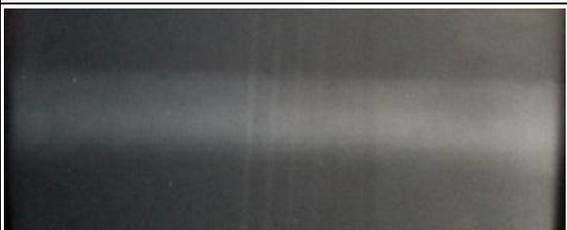
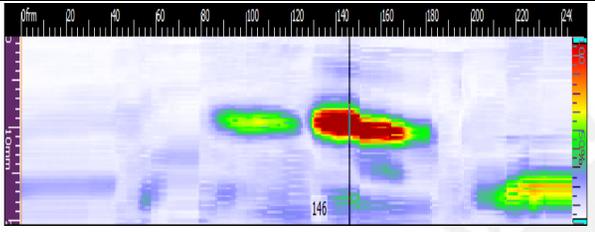
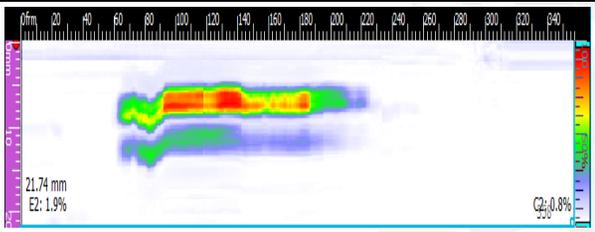
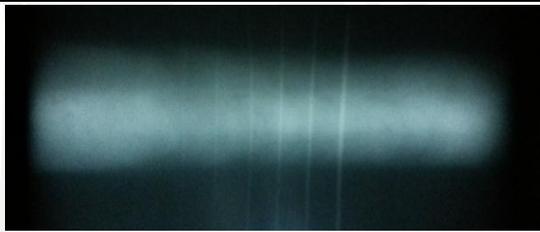
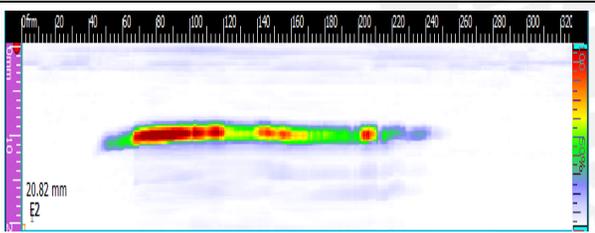
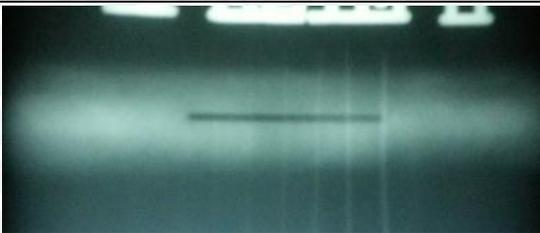
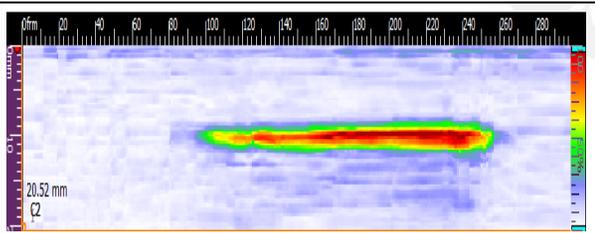
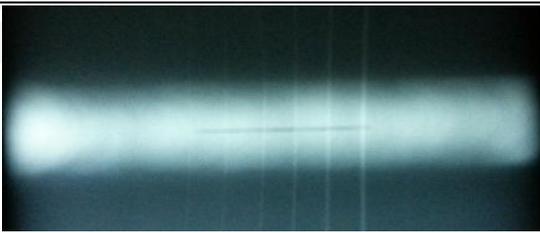
	VISTA C-SCAN (PLACA)	Placa Ensayada Rayos X	Placa Ensayada por Rayos gamma
PROBETA N°1			
PROBETA N°2			
PROBETA N°5			
PROBETA N°6			

Tabla 3.12 - Tabla Comparativa muestra una imagen C-Scan, placa radiográfica por RX y placa radiográfica por rayos gamma de probetas N°7, 8, 11 y 13

	VISTA C-SCAN (PLACA)	Placa Ensayada Rayos X	Placa Ensayada por Rayos gamma
PROBETA N°7			
PROBETA N°8			
PROBETA N°11			
PROBETA N°13			

3.3.- Conclusiones del Ensayo

Los resultados del ensayo por rayos gamma muestran que no se pudo diferenciar claramente los defectos presentes en alguna de las probetas; al contrario del ensayo de ultrasonido y el de rayos X. Sin embargo, se puede notar que en la probeta N°8 mediante el ensayo de rayos X, la apreciación de la discontinuidad no ha sido la mejor, no obstante el ensayo de ultrasonido detectó claramente la discontinuidad.

Se demuestra que las placas fueron tomadas correctamente, respetando la distancia y tiempo de exposición, ya que los indicadores de calidad (IQI) se visualizan adecuadamente.

Se realizó un análisis minucioso por el método de ultrasonido, en la que se caracterizó y dimensionó adecuadamente cada uno de los defectos hallados en las probetas; es así que, de la tabla 3.9 se comparan los resultados obtenidos con los resultados del fabricante (Sonaspection). En ellos se puede apreciar que el promedio de diferencia de resultados en cuanto a longitud es 1.7 mm, teniéndose la máxima diferencia en la probeta N°6 con un valor de 4 mm y la mínima diferencia en la probeta N°1 con un valor de 0.5 mm.

Se concluye que el equipo de UTPA fue correctamente calibrado, ya que se obtuvo resultados muy exactos en el dimensionamiento (tanto longitud como profundidad) y ubicación de las discontinuidades.

Asimismo con el ensayo de UTPA hemos podido discriminar el tipo de discontinuidad que se encontraba en cada una de las probetas ensayadas; sin embargo, en la probeta N°13 fue complicado determinar el tipo de discontinuidad volumétrica que representaba.

Se encontró que en la probeta N°6, se necesitó de un incremento en la sensibilidad del equipo, para poder discriminar la discontinuidad presente en la probeta, esto generó que se reciban otras señales falsas en la inspección.

Finalmente de las tablas 4.10 y 4.11 se pueden comparar la vista sectorial y la imagen de la discontinuidad dada por el fabricante, donde claramente se aprecia la exactitud que se consiguió con la técnica de arreglo de fases.

Capítulo 4

PROCEDIMIENTO FINAL DE INSPECCIÓN MEDIANTE ULTRASONIDO DE ARREGLO DE FASES

1.0. Propósito

Este procedimiento describe el método de inspección para ultrasonido de arreglo de Fases (*Phased Array*) de las uniones soldadas, en acuerdo con ASME Sección V, art. 4

2.0. Alcance

2.0. Este procedimiento sólo es aplicable a los exámenes por ultrasonidos realizados por el Código ASME Sección V, art. 4. Apéndices Obligatorio IX.

2.1. Este procedimiento cubre las técnicas para el examen ultrasónico *Phased Array* en materiales de bajo carbono y material de acero austenítico y configuraciones de soldadura a Tope tanto en simple “V”, como en doble “V”, para detectar discontinuidades. Se especifica el método de reflexión mediante ondas pulsantes.

2.3. Este Procedimiento Específico utiliza rayos angulares, ya sea en los modos E-Scan o S-Scan, sobre todo para el examen de las soldaduras de penetración completa a tope. Los exámenes se realizarán con la técnica de examen de pulso-eco.

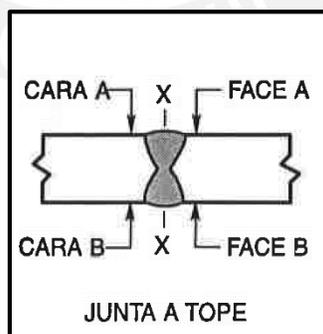


Figura 5.1 - Configuraciones de junta a Tope (Doble “V”)

2.5. El procedimiento específico está destinado a ser utilizado en espesores de 8 a 25 mm. Espesores mayores y menores pueden ser probados utilizando este procedimiento específico, si la

técnica puede ser demostrada para proporcionar una detección adecuada en maquetas del mismo espesor de la pared y la geometría, se podrá hacer uso de la misma.

2.6. El volumen de inspección se extiende a lo largo de su espesor y para ambos lados de la soldadura hasta el tamaño de una distancia mínima de un "t" espesor del material, desde el punto de la soldadura más ancha. Para juntas soldadas de diferentes espesores, será considerado el mayor espesor. El área de inspección se medirá a partir de los bordes de soldadura.

3.0. Normas de referencia

3.1. Código ASME BPV Sección V Artículo 4. Examen no destructivo. Última edición, según corresponda.

3.2. ASTM E-2700 (Edición 2009) Práctica estándar para Contacto Prueba de ultrasonidos de soldaduras Uso de arreglos de fase.

3.3. ASTM E164: Práctica estándar para Contacto Prueba de ultrasonidos de piezas soldadas. Última edición.

3.4. ASTM E1316: Terminología para no destructivos Exámenes. Última edición.

3.5. ASME Código del encapsulado BPVC 2557: El uso de *Phased Array* Manual S-Scan examen ultrasónico. Última edición.

4.0. Definición y abreviaturas

CÓDIGO: Conjunto de requisitos y condiciones generalmente aplicables a uno o más procesos de regulación de manera integral en un diseño, materiales, fabricación, construcción, montaje, instalación, prueba, reparación, operación y mantenimiento de los equipos de las instalaciones, estructuras y componentes específicos. Un conjunto de leyes, de una nación, ciudad, etc., dispuesto de forma sistemática para una fácil referencia.

ESTÁNDAR: El término "estándar" usadas por AWS, ASTM, ASME, ANSI se aplica indistintamente a las especificaciones, códigos, métodos, prácticas recomendadas, definición de términos, clasificaciones y símbolos gráficos que han sido aprobados por el comité promotor de la sociedad técnica determinada y adoptado por esta sociedad. Algo establecido para su uso como una regla o base de comparación para medir o juzgar la capacidad, la cantidad, contenido, extensión, valor, calidad, etc.

SOLDADURA: Una coalescencia localizada de metales o no metales producida ya sea por calentamiento de los materiales a la temperatura de soldadura, con o sin la aplicación de presión, o mediante la aplicación de presión solamente y con o sin el uso de material de aporte.

JUNTA DE PENETRACIÓN COMPLETA (CJP): Condición de soldadura en la cual la soldadura del metal se extiende a través del espesor de la junta.

FUSIÓN INCOMPLETA: Es una discontinuidad de soldadura en la cual no ocurre fusión entre metales base y caras de fusión o bordes de soldadura. Es el resultado de una inadecuada técnica de soldeo, inadecuada preparación del material base, o inadecuado diseño de junta.

DEFECTO: Una discontinuidad o discontinuidades que por naturaleza o efecto acumulado representan una parte o producto incapaz de cumplir con los estándares mínimos de aceptación o de las especificaciones aplicables. El término designa rechazable.

DISCONTINUIDAD: Una interrupción de la estructura típica de un material, tal como una falta de homogeneidad en sus características mecánicas, metalúrgicas, o física. Una discontinuidad no es necesariamente un defecto.

POROSIDAD: Es una discontinuidad, típicamente es una cavidad, formada por atrapamiento de gas durante la solidificación del metal de soldadura o en un depósito por corte por aire. La discontinuidad que se forma es generalmente esférica pero puede ser alargada o irregular. Una causa común de las porosidades es la contaminación durante la soldadura.

FUSIÓN INCOMPLETA: Es una discontinuidad de soldadura en el que la fusión no se produjo entre el metal de soldadura y las caras de fusión o las zonas de soldadura adyacentes. Es el resultado de inadecuadas técnicas de soldadura, preparación inadecuada del metal o inadecuado diseño de junta.

PENETRACIÓN INCOMPLETA: Es una condición de la raíz de la junta en la cual el metal de soldadura no se extiende a través del espesor de la junta, es un área de inadecuada penetración y fusión, es una discontinuidad descrita como fusión incompleta de la junta. Penetración incompleta de la junta, puede generarse como resultado de un insuficiente aporte de calor, diseño de la unión inadecuada, o un control inadecuado del arco de soldadura.

FISURAS: Es definida como una fractura, un tipo de discontinuidad caracterizada por su terminación afilada y una alta relación de longitud y ancho a lo largo de la discontinuidad. Puede encontrarse en el metal de soldadura, debido al esfuerzo del material. Las fisuras a menudo se

inician en las concentraciones de esfuerzos causados por discontinuidades o cerca de otras muescas mecánicas asociadas con el diseño de piezas soldadas.

SOCAVACIONES: Es una acanaladura o ranura fundida adyacente al material base al pie de la soldadura o raíz de la junta, que no es llenado por el metal de soldadura. Esta ranura crea una muesca mecánica, la cual es un concentrador de esfuerzos.

INCLUSIÓN DE ESCORIA: Son productos no metálicos resultantes de la disolución mutua del fundente y las impurezas no metálicos en algunos procesos de soldadura y soldadura fuerte. En general, las inclusiones de escoria se pueden encontrar en las soldaduras realizadas con cualquier proceso de soldadura por arco que emplea fundente como un medio de protección.

MOVIMIENTO DEL HAZ: Es el conjunto de leyes focales que ofrece una serie de haces en forma de abanico a través de un rango definido de ángulos utilizando el mismo conjunto de elementos.

LEY FOCAL: Se define como un archivo de matriz en fase operativa que define los elementos de la unidad de búsqueda y sus retardos de tiempo, tanto para el transmisor y la función del receptor.

5.0. Bases de aplicación

Los siguientes puntos son objeto de un acuerdo contractual entre las partes que utilizan o que hacen referencia a esta norma.

5.1 Preparación de la superficie: Los criterios de la preparación de la superficie a examinar deberán ser conforme con la sección 10.1 de este documento

5.2 Medida de examen: El alcance del examen deberá ser adecuado para examinar el volumen de la soldadura más la zona afectada por el calor a menos que se especifique lo contrario.

6.0. Estándares de calibración

6.1 Rango

6.1.1. La pantalla del instrumento se ajustará con los A-scan para cada ley focal utilizada para proporcionar una indicación precisa de los recorridos del sonido en el material de prueba. El rango de normalización incluirá corrección para el tiempo de viaje de cuña de manera que la posición de zero-profundidad en la pieza de ensayo se indica con precisión para cada ley focal.

6.1.2. Los rango de normalización se establecerá mediante las superficies de radio en bloques de referencia, como el Bloque IIW y estos bloques serán hechas del mismo material o material acústicamente similar a la pieza de ensayo.

6.1.3. La calibración se realiza con el bloque de calibración de tipo IIW o DSC (Distancia y calibración de la sensibilidad), la pantalla se calibra en un rango de 4 "(100 mm), 5" (125 mm), 10 "(250 mm), etc. Pero antes de iniciar la calibración del equipo, se debe verificar lo siguiente:

- Cada calibración para la inspección se hará con el rechazo apagado.
- La calibración se llevará a cabo antes y en el lugar de la inspección.

6.2 Sensibilidad

6.2.1. Los patrones de referencia para la normalización de sensibilidad de amplitud deben estar diseñados de manera que la sensibilidad no varía con el ángulo de haz cuando se realiza la prueba de haz angular. Los estándares de las sensibilidades de la amplitud que logran pasar son del lado perforado agujeros paralelos a las superficies principales de la placa y perpendicular a la trayectoria del sonido, los agujeros de fondo plano perforados en el ángulo de la prueba, y reflectores de igual radio. Muecas de superficie se pueden utilizar en algunas circunstancias, pero generalmente no se recomiendan.

6.2.2 El mismo acoplante se tendrá que usar en la normalización y en la inspección.

6.2.3. Las mismas cuñas de contacto o los sistemas de inmersión/inundadoras utilizados durante la inspección se utilizarán para la normalización.

6.2.4. La misma ley focal utilizada en la normalización se utilizará durante la inspección.

6.2.5. Los comandos que afectan la respuesta de amplitud del instrumento (por ejemplo, duración del impulso, filtros, media, etc.) estarán en la misma posición para la normalización y en la inspección.

6.2.6. Los mandos que afecta a la linealidad del instrumento (por ejemplo, el recorte, rechazar, supresión) no se utilizarán.

7.0. Condiciones de acoplamiento

7.1. Preparación de la superficie

7.1.1 Cuando sea accesible, preparar la superficie de deposición de la soldadura para que se deposite de tal manera que se funda en las superficies de los materiales de base adyacentes; Sin embargo, la soldadura puede ser examinada en la condición de soldado, siempre que el estado de la superficie, no interfiere con la interpretación válida de las indicaciones.

7.1.2. Limpiar las superficies de escaneado sobre el material base de las salpicaduras de soldadura, escala, suciedad, óxido, y cualquier rugosidad extrema en cada lado de la soldadura para una distancia igual a varias veces el espesor del material de producción, esta distancia que se rige por el tamaño de la unidad de búsqueda y el ángulo refractado del haz de sonido. Cuando el escaneado se va a realizar a lo largo de la parte superior o a través de esta soldadura, el refuerzo de soldadura se puede moler para proporcionar una superficie plana de exploración. Es importante producir una superficie de lo más plana posible. Generalmente, las superficies no requieren de pulido; lijado suave con un disco o cinta lijadora suele proporcionar una superficie satisfactoria para la inspección.

7.2 Acoplante

7.2.1 Un medio de acoplamiento, normalmente un líquido o semi-líquido, se requiere entre la cara de la unidad de búsqueda y la superficie para permitir la transmisión de la energía acústica de la unidad de búsqueda para el material bajo inspección. El medio de acoplamiento debe humedecer las superficies de la unidad de búsqueda y la pieza de ensayo, y eliminar cualquier espacio de aire entre los dos. Acopladores típicos incluyen agua, aceite, grasa, glicerina, y goma de celulosa. El medio de acoplamiento utilizado no debe ser perjudicial para el material a ser examinado, debe formar una película delgada, y, con la excepción del agua, deben utilizarse con moderación.

7.2.2. El medio de acoplamiento debe ser seleccionado de manera que su viscosidad sea apropiada para el acabado de la superficie del material a ser examinado.

7.2.3. Para la inspección de contacto, la diferencia de temperatura entre el bloque de referencia y la superficie de examen deberá estar dentro de 15 ° C (25 ° F).

8.0 Curva de corrección de distancia-amplitud

8.1. Los patrones de referencia para la normalización de sensibilidad de amplitud se construirán con materiales con un acabado superficial similar, espesor nominal y metalúrgico similar en términos de aleación y tratamiento térmico de la soldadura.

8.2. Los métodos alternativos de distancia-amplitud de la corrección de la sensibilidad se podrán utilizar siempre los resultados son tan fiables como los obtenidos por el método aceptable. Además, el método alternativo y su equipo deberán cumplir con todos los requisitos de rendimiento de esta norma.

9. Reflectores de referencia:

9.2 Normalización de haz angular: La corrección para la inspección de haz angular puede ser determinada por medio de reflectores de taladrado transversal en $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$ del espesor. La profundidad espesor de $\frac{1}{2}$ a un orificio del lado se puede añadir a la normalización utilizado solo en espesores inferiores a 25 mm (1 pulg.). Para ciertas combinaciones de pared delgada y lado del tubo de pequeños diámetros perforados con agujeros pueden no ser prácticos y muescas superficiales pueden ser utilizados con el acuerdo entre las partes contratantes.

10.0. Evaluación de la indicación

El método de evaluación usado, en cierta medida, dependerá de si se utilizó la exploración manual o codificada.

10.1. Exploración manual:

10.1.1. Para la inspección manual mediante redes en fase el personal deberá utilizar un tiempo real S-scan o pantalla B-scan durante el escaneo para monitorear la calidad del acoplamiento y las señales que superen el umbral de evaluación.

10.1.2. Para la evaluación de las indicaciones detectadas utilizando métodos manuales de elementos en fase requerirá que el operador evalúe todas las indicaciones que superen el umbral de evaluación (20%) cuando se detecta una indicación durante el proceso de escaneo. Algunos sistemas de arreglo pueden incluir opciones para introducir algunos elementos en un formato de informe y la incorporación de S-scan o imágenes-B exploración como parte del informe.

11.2. Determinación del tamaño de la indicación:

11.2.1. La longitud de la indicación se determina generalmente mediante la determinación de la distancia entre los puntos a lo largo de la longitud de la soldadura donde la amplitud cae a la mitad del máximo en los extremos del reflector, o cuando la amplitud cae a la mitad de la amplitud de evaluación mínimo (50% o 6 dB).

11.2.2. Las estimaciones de la altura de indicación se pueden hacer usando la caída de 6 dB determinado a partir de la S-scan o B-scan (ver figura 5.2). Este método es adecuado para grandes defectos planares con extensiones superiores a la viga. Para defectos con dimensiones más pequeñas la corrección para la divergencia del haz puede usarse para mejorar las estimaciones de tamaño. Para las indicaciones orientadas adversamente con superficies irregulares, las técnicas de tamaño de amplitud pueden no indicar con precisión el tamaño o la gravedad de las indicaciones. Para estos casos las técnicas de mejora de las capacidades de tamaño descritas en la Guía E-2192 pueden ser más adecuadas y pueden ser adaptados a las aplicaciones de elementos en fase.

11.2.3. Una indicación de una imperfección puede ser mayor que la imperfección que lo causa; sin embargo, el tamaño de la indicación es la base para la evaluación de la aceptación. . Sólo los indicios de que tienen alguna dimensión superior a 1/16 pulgadas (1,5 mm) se considerarán pertinentes:

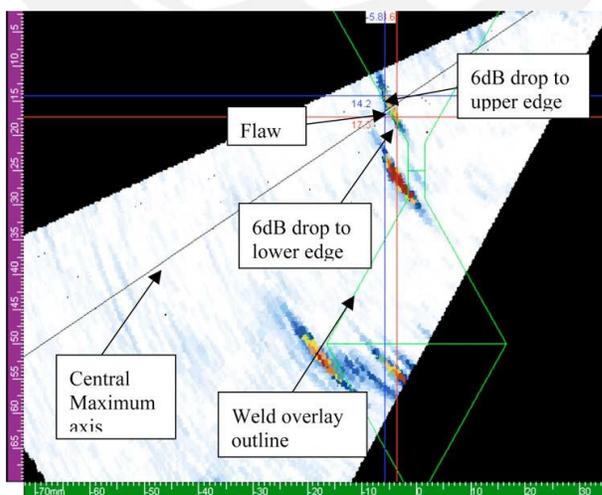


Figura 5.2 – Dimensionamiento de una discontinuidad en vista S-scan

a. Una indicación lineal es uno que tiene una longitud mayor que tres veces la anchura.

- b. Una indicación redondeada es uno de forma circular o elíptica con una longitud igual o menor que tres veces su anchura.
- c. Cualquier indicación cuestionable o dudosa deben ser revisadas para determinar si son o no son relevantes.

12. Normas de aceptación

12.1. Las imperfecciones que producen una respuesta superior al 20% del nivel de referencia deben ser investigadas hasta que el inspector puede determinar la forma, la identificación y ubicación de cada una de las imperfecciones y la evaluación en términos de los criterios de aceptación y rechazo dados.

12.2. Indicaciones Caracterizado como grietas falta de fusión o penetración incompleta se consideran inaceptables, independientemente de la longitud.

12.3. Otras imperfecciones son inaceptables si las indicaciones exceden el nivel de referencia de la amplitud, de acuerdo con los criterios de aceptación y rechazo indicados en los apéndices.

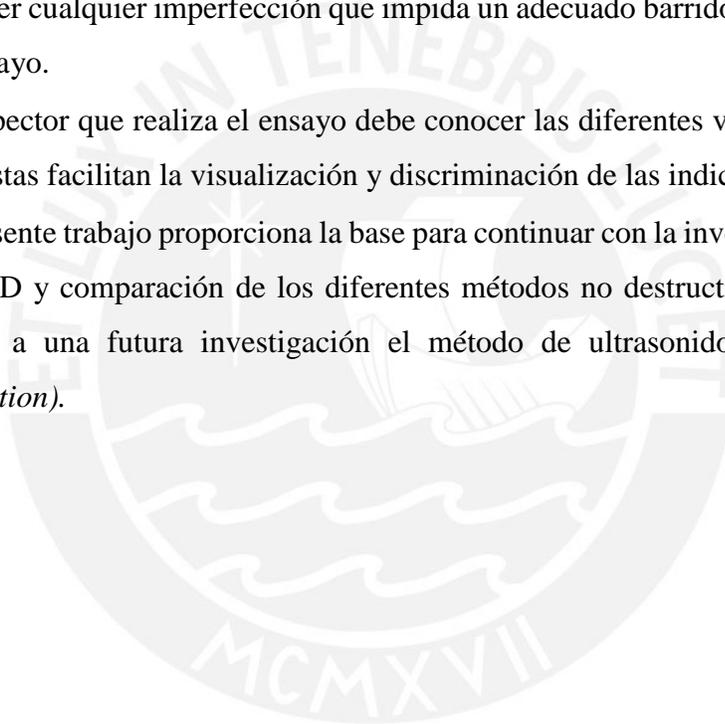
12.4. Las imperfecciones se deben indicar en la soldadura, con una marca directamente sobre la imperfección en toda su longitud. La profundidad de la imperfección de la superficie debe ser escrito hecho en una zona cercana al metal base.

CONCLUSIONES

- De los resultados obtenidos se puede decir que el ultrasonido de arreglo de fases ha sido capaz de encontrar todas las discontinuidades de las probetas ensayadas de juntas a tope de espesor de 10 mm; en 7 de ellas (probetas N°1, 2, 5, 7, 8, 11, 13) se puede apreciar con facilidad la discontinuidad y se observa que las características de las discontinuidades están acordes con los resultados dados por el fabricante (Sonaspection).
- Asimismo se aprecia que los resultados del ensayo de rayos X, fueron mucho más sensibles que los de rayos gamma; esto, confirma que la sensibilidad y la posibilidad de detección del ensayo gammagráfico es mucho menor.
- De igual manera si se compara los resultados del ultrasonido *Phased array* con el ensayo de rayos X o rayos γ se identifica que el ensayo de ultrasonido es más sensible que las otras técnicas antes mencionadas para el rango de espesor ensayado.
- La técnica de Phased Array con una vista C-scan que es una vista de planta como la de radiografía, en comparación con las placas radiográficas tomadas tanto por Rx y R γ , muestra que tiene una mejor visualización o señal de los defectos de las probetas ensayadas.
- Se ha podido comprobar que la técnica de ultrasonido Phased Array es una alternativa viable para la inspección de juntas a tope con diseño en simple “V” para el rango de espesores ensayado; ya que se ha verificado que esta técnica posee igual o mayor sensibilidad (por ende posibilidad de detección) que la técnica de radiografía industrial.
- Se desarrolló un procedimiento final de inspección mediante ultrasonido Phased Array y su aplicación en uniones soldadas con juntas a tope en forma de simple “V”, para un rango de espesores entre 8 a 25 mm. Pudiéndose realizar nuevamente estos ensayos, así como también utilizarlo para su aplicación en la fabricación de piezas y componentes.

RECOMENDACIONES

- El ensayo de Phased Array debe ser realizado por personal entrado y calificado, ya que es un ensayo que requiere de experiencia en la discriminación de señales falsas.
- Antes de realizarse el ensayo debe asegurarse el buen estado de los instrumentos tales como equipo, cables, transductores y zapatas, para así asegurar una correcta calibración y examinación de las piezas a evaluar.
- Antes de que se realice el ensayo de ultrasonido, debe limpiarse la superficie a fin de remover cualquier imperfección que impida un adecuado barrido y examinación de la zona de ensayo.
- El inspector que realiza el ensayo debe conocer las diferentes vistas de inspección puesto que, estas facilitan la visualización y discriminación de las indicaciones.
- El presente trabajo proporciona la base para continuar con la investigación sobre el análisis del PoD y comparación de los diferentes métodos no destructivos. Es así que se podría añadir a una futura investigación el método de ultrasonido TOFD (*Time of Flight Diffraction*).



BIBLIOGRAFÍA

- The benefits of phased array aut vs. radiography, M. Moles, A. Lamarre, Olympus NDT Canada, Canada.
- “Ultrasonic phased array nivel I”, ADEMinsa GROUP OF COMPANIES, L. Chirinos Martinez, Lima, 2013.
- Fereidoon Marefat, M. Reza Faghedi, A. Reza Khodabandeh, (2012, Abril), Risk and Reliability of Radiographic and Phased Array Ultrasonic Test on the Inspection. Consultada el 23 de Setiembre de 2013
- ASME BPVC Section V. Nondestructive examination.
- ASME Sec V. art 4, paragraph E-474-2007, UT Phased Array Technique.
- ASTM E2700-09 y ASTM E2491-06 Práctica estándar para inspecciones de Ultrasonicas de soldaduras usando el método de Phased Array
- Olympus NDT, Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline, 48 Woerd Avenue, Waltham USA, 2004.
- Olympus NDT, Phased Array Testing: Basic Theory for Industrial Applications, , 48 Woerd Avenue, Waltham, USA, November 2010.
- Olympus NDT, Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications, 48 Woerd Avenue, Waltham, USA, 2007.
- Edward Ginzel, Phased Array Ultrasonic Technology, 2nd Edition, Canada, 2013.

- Jochen H. Kurz, Probability of Detection (POD) determination using ultrasound phased array for considering NDT in probabilistic damage assessments, World Conference on Nondestructive Testing, Durban, 2012.

