

METODOLOGÍA PARA LA INSPECCIÓN Y DETECCIÓN DE FALLAS EN
PLACAS GRANDES DE ACERO (ACERO 1020 Y ACERO INOXIDABLE SERIE
300 AISI), MEDIANTE EL USO DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO PHASED
ARRAY

JESUS DAVID CAEZ ORTIZ
JEIVER HAIR RUEDA BAUTISTA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2019

METODOLOGÍA PARA LA INSPECCIÓN Y DETECCIÓN DE FALLAS EN
PLACAS GRANDES DE ACERO (ACERO 1020 Y ACERO INOXIDABLE SERIE
300 AISI), MEDIANTE EL USO DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO PHASED
ARRAY

JESUS DAVID CAEZ ORTIZ
JEIVER HAIR RUEDA BAUTISTA

Proyecto de grado para optar al título de ingeniero mecánico.

Director
HELLER GUILLERMO SANCHEZ ACEVEDO
PhD. INGENIERÍA MECÁNICA, APLICADA Y COMPUTACIONAL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2019

DEDICATORIA

A mis padres.

JESUS DAVID CAEZ ORTIZ

Dedico este proyecto a Dios por protegerme durante todo mi camino y darme fuerza para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda la vida, de igual forma a mi madre por la confianza y el apoyo brindado, que sin duda alguna en el trayecto de mi vida me ha demostrado su amor, corrigiendo mis fallas y celebrando mis triunfos, y a mis hermanos por todo el apoyo brindado.

JEIVER HAIR RUEDA BAUTISTA

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al SENA por su puntualidad en la elaboración de los bloques patrones de calibración.

Al profesor Heller por su ayuda y servirnos de guía durante el proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	16
1. DESCRIPCION DEL PROYECTO.....	17
1.1 IDENTIFICACION DEL PROBLEMA	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
2.2 OBJETIVO ESPECIFICO	19
3. JUSTIFICACION.....	20
4. MARCO TEORICO	21
4.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	21
4.2 PRINCIPIOS Y CONCEPTOS BASICOS DE ULTRASONIDO	22
4.2.1 Nociones básicas.....	23
4.2.2 Impedancia acústica.....	24
4.2.3 Fenómenos de las ondas.....	25
4.2.4 Tipos de ondas ultrasónicas.....	29
4.2.5 Generación de ultrasonido.....	31
4.3 ULTRASONIDO MEDIANTE LA TECNICA PHASED ARRAY	35
4.3.1 Principio de funcionamiento del Phased Array.....	37
4.3.2 Características de los palpadores Phased Array.....	43
4.3.3 Características de zapatas en Phased Array.....	45
4.3.4 Representación de las vistas del ultrasonido Phased Array.....	47
4.3.5 Localización de discontinuidades.....	53
4.4 CALIBRACIÓN EQUIPOS DE ULTRASONIDO	57
4.5 PROCESO DE SOLDADURA	60
4.5.1 Determinación de los defectos en el proceso de soldadura.....	62
4.5.2 Normas enfocadas al proceso de soldadura.....	69
5. METODOLOGIA PARA INSPECCION DE PLACAS PLANAS	71
5.1 CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO.....	72
5.2 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO	74
5.2.1 Parámetros de ultrasonido.....	74
5.2.2 Parámetro de dimensionamiento. Curva TCG	77

5.3 AJUSTES PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN PLACAS PLANAS	78
5.3.1 Configuración del VersaMOUSE.	78
5.3.2 Ajustes de las puerta A,I y B.	80
6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA EN LA DETECCION DE FALLAS EN SOLDADURA Y ESPESORES EN ACERO SAE 1020 Y ACERO INOXIDABLE 304.	82
7. RESULTADOS	89
7.1 RESULTADOS INSPECCIÓN DE ESPESOR.....	89
7.2 RESULTADOS INSPECCIÓN DE SOLDADURA.	91
8. CONCLUSIONES	103
9. RECOMENDACIONES.....	104
BIBLIOGRAFIA	106

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Reflexión de una Onda	26
Figura 2. Refracción de una onda.....	27
Figura 3. Difracción en una Onda	27
Figura 4. Interferencia en Ondas	28
Figura 5. Absorción de una Onda	28
Figura 6. Ondas Longitudinales Y Ondas Transversales.	30
Figura 7. Ondas Rayleigh	31
Figura 8. Efecto Magnetostrictivo.	32
Figura 9. Efecto Piezo eléctrico	33
Figura 10. Olympus MX2	36
Figura 11. Ultrasonido convencional vs Ultrasonido Phased Array	36
Figura 12. Detección de fisuras mal orientadas por sondas mono cristalinas (izquierda) y detección de fisuras a través del multielemento (derecha).	38
Figura 13. Formación del haz y retardo de tiempo para la pulsación y recepción de haces múltiples (misma fase y amplitud)	39
Figura 14. Principio de enfoque del haz a) incidencia normal b) incidencia angular	39
Figura 15. Grupo Activo Phased Array	40
Figura 16. Escaneo Electrónico	41
Figura 17. Escaneo Sectorial	42
Figura 18. Enfoque dinámico en profundidad	42
Figura 19. Elementos Palpadores Phased Array	43
Figura 20. Vista de Corte sonda Phased Array	44
Figura 21. Nomenclatura usada en sondas Phased Array estándar	45
Figura 22. Sondas Olympus Phased Array	46
Figura 23. Nomenclatura Usada en Zapatas Olympus Estándar	46
Figura 24. Representación Vistas ultrasonido Phased Array	47
Figura 25. Ejemplo de varias representaciones con varias reglas o escalas.	48
Figura 26. Representación A-scan	49
Figura 27. Representación C-scan	49
Figura 28. Representación S-scan	50
Figura 29. Vistas del S-can para inspecciones con incidencia normal(a) incidencia angular (b) incidencia sectorial	51
Figura 30. Múltiples vistas sistema Phased Array	52
Figura 31. Representación dinámica Ray-Tracing	53
Figura 32. Distancia de medio salto y un salto	54
Figura 33. Discontinuidad detectada	55
Figura 34. Discontinuidad en segunda pierna.	56
Figura 35. Bloque IIW V1	58
Figura 36. Bloque IIW V2	59
Figura 37. Boque escalonado	60
Figura 38. Discontinuidades comunes en cordón de soldadura	64
Figura 39. Inclusión de Escoria.	65
Figura 40. Fusión Incompleta.	66

Figura 41. Tipos de grietas en soldadura	66
Figura 42. Porosidad con discontinuidad uniforme.....	68
Figura 43. Bloque de calibración IIW V1 modificado	71
Figura 44. Zapata sectorial (derecho) y zapata lineal (izquierdo).....	72
Figura 45. Calibración de Sensibilidad	74
Figura 46. Calibración de Velocidad.	75
Figura 47. Calibración de retardo de zapata.....	76
Figura 48. Calibración curva TCG.	77
Figura 49. Ensamble VersaMOUSE-zapata sectorial.....	79
Figura 50. Ensamble VersaMOUSE-zapata lineal.....	79
Figura 51. Menú de ajuste puertas A, I y B.....	81
Figura 52. Configuración C-scan para escaneo	81
Figura 53. Dimensiones placa de acero SAE 1020	82
Figura 54. Ubicación y dimensiones de imperfecciones inducidas en placa de acero SAE 1020 ...	83
Figura 55. Dimensiones placa de Acero inoxidable AISI 304.....	83
Figura 56. Ubicación y dimensiones de imperfecciones inducidas en placa de acero inoxidable ...	84
Figura 57. Características sección de soldadura.....	85
Figura 58. Vista transversal del cordón de soldadura a través del OmniScan mx2.....	85
Figura 59. Configuración final para inspección de espesor sobre placa de acero AISI 304	86
Figura 60. Configuración final para inspección de espesor placa de acero SAE 1020.....	86
Figura 61. Configuración final para inspección de soldadura sobre placa de acero AISI 304	87
Figura 62. Configuración final para inspección de soldadura sobre placa de acero SAE 1020.....	87
Figura 63. Resultados de inspección espesor placa de acero AISI 304	89
Figura 64. Resultados de inspección espesor placa de acero SAE 1020.....	90
Figura 65. Parámetros para localización de imperfecciones.	92
Figura 66. Sección de placa de acero SAE 1020 inspeccionada (izquierda) y Ubicación de discontinuidades (derecha).....	93
Figura 67. Visualización discontinuidad N° 1 placa de acero SAE 1020.....	93
Figura 68. Visualización discontinuidad N° 2 placa de acero SAE 1020.....	94
Figura 69. Visualización discontinuidad N° 3 placa de acero SAE 1020.....	95
Figura 70. Visualización discontinuidad N° 4 placa de acero SAE 1020.....	95
Figura 71. Visualización discontinuidad N° 5 placa de acero SAE 1020.....	96
Figura 72. Visualización discontinuidad N° 6 placa de acero SAE 1020.....	97
Figura 73. Sección de placa de acero inoxidable inspeccionada (izquierda) y Ubicación de discontinuidades (derecha).....	98
Figura 74. Visualización discontinuidad N° 1 placa de acero AISI 304	98
Figura 75. Visualización discontinuidad N° 2 placa de acero AISI 304	99
Figura 76. Visualización discontinuidad N° 3 placa de acero AISI 304	100
Figura 77. Visualización discontinuidad N° 4 placa de acero AISI 304	100
Figura 78. Visualización discontinuidad N° 5 placa de acero AISI 304	101
Figura 79. Visualización discontinuidad N° 6 placa de acero AISI 304	102

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ensayos no destructivos	22
Tabla 2. Clasificación de grietas.	67
Tabla 3. Clasificación de discontinuidades	70
Tabla 4. Caracterización discontinuidad N.º 1 placa de acero SAE 1020	94
Tabla 5. Caracterización discontinuidad N.º 2 placa de acero SAE 1020	94
Tabla 6. Caracterización discontinuidad N.º 3 placa de acero SAE 1020	95
Tabla 7. Caracterización discontinuidad N.º 4 placa de acero SAE 1020	96
Tabla 8. Caracterización discontinuidad N.º 5 placa de acero SAE 1020	96
Tabla 9. Caracterización discontinuidad N.º 6 placa de acero SAE 1020	97
Tabla 10. Caracterización discontinuidad N.º 1 placa de acero AISI 304	99
Tabla 11. Caracterización discontinuidad N.º 2 placa de acero AISI 304	99
Tabla 12. Caracterización discontinuidad N.º 3 placa de acero AISI 304	100
Tabla 13. Caracterización discontinuidad N.º 4 placa de acero AISI 304	101
Tabla 14. Caracterización discontinuidad N.º 5 placa de acero AISI 304	101
Tabla 15. Caracterización discontinuidad N.º 6 placa de acero AISI 304	102

LISTA DE ANEXOS

“ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizar en la base de datos de la Biblioteca UIS”.

Anexo A. Metodología para inspección de soldadura

Anexo B. Metodología para inspección de espesor

Anexo C. Configuración de VersaMOUSE para inspección de placas planas

RESUMEN

TÍTULO: METODOLOGÍA PARA LA INSPECCIÓN Y DETECCIÓN DE FALLAS EN PLACAS GRANDES DE ACERO (ACERO 1020 Y ACERO INOXIDABLE SERIE 300 AISI), MEDIANTE EL USO DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO PHASED ARRAY.¹

AUTORES: JESUS DAVID CAEZ ORTIZ, JEIVER HAIR RUEDA BAUTISTA^{**}

PALABRAS CLAVES: Ultrasonido Phased Array, OmniScan MX2, inspección de soldadura, inspección de espesores, detección de fallas, palpadores, zapatas.

DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto tiene como objetivo establecer una metodología para la inspección y detección de fallas en placas planas que permita a los estudiantes de ingeniería mecánica de la universidad industrial de Santander conocer el potencial de los equipos disponibles en los laboratorios y hacer un uso correcto de ellos.

Para el desarrollo de la metodología se contó con el escáner OmniScan MX2 equipo especial para realizar ensayos mediante la técnica de ultrasonido Phased Array, equipado con una sonda de Olympus 5L64 A12 de 64 elementos y con una capacidad de 5 MHz además de dos zapatas una para inspección de soldadura SA12-N55S de ondas transversales y otra para inspección de espesores y corrosión SA12-OL de ondas longitudinales así como accesorio para la movilidad del conjunto sonda-zapata se cuenta con el VersaMOUSE codificador de posición diseñado por Olympus para la recolección de datos en inspección semi automatizado. Para la calibración del equipo se cuenta con los patrones de calibración V1 modificados material SAE 1020 y AISI 304. Se presenta los resultados obtenidos al aplicar la metodología tanto para la inspección de soldadura como para la inspección de espesores y caracterizan algunas de las fallas presentes en la soldadura de cada una de las placas. Por último, se presentan unas recomendaciones útiles para la inspección por ultrasonido Phased array.

¹ Trabajo de grado

^{**} Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Heller Guillermo Sánchez Acevedo. PhD En Ingeniería Mecánica, Aplicada y Computacional.

ABSTRACT

TITLE: METHODOLOGY FOR THE INSPECTION AND DETECTION OF FAULTS IN LARGE PLATES OF STEEL (STEEL 1020 AND STAINLESS-STEEL SERIES 300 AISI), THROUGH THE USE OF THE PHASED ARRAY ULTRASOUND TECHNIQUE.*

AUTHORS: JESUS DAVID CAEZ ORTIZ, JEIVER HAIR RUEDA BAUTISTA**

KEYWORDS: Ultrasonic Phased Array, OmniScan MX2, welding inspection, thickness inspection, fault detection, probes, wedges.

DESCRIPTION:

The objective of this project is to establish a methodology for the inspection and detection of faults in flat plates that allows the students of mechanical engineering of the industrial university of Santander to know the potential of the equipment available in the laboratories and make a correct use of them.

For the development of the methodology, the OmniScan MX2 scanner was equipped with special equipment to carry out tests using the Phased Array ultrasound technique, equipped with an Olympus 5L64 A12 probe with 64 elements and a capacity of 5 MHz, plus two brake wedges. Welding inspection SA12-N55S of transverse waves and another for inspection of thicknesses and corrosion SA12-OL of longitudinal waves as well as accessory for the mobility of the set probe-wedge is counted on the VersaMOUSE position encoder designed by Olympus for data collection in semi-automated inspection. For the calibration of the equipment we have the modified V1 calibration standards material SAE 1020 and AISI 304. Finally, we present the results obtained by applying the methodology both for welding inspection and thickness inspection and characterize some of the faults present in the welding of each of the plates. Finally, some useful recommendations for ultrasound inspection by technique phased array.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Mechanical and Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director. Heller Guillermo Sánchez Acevedo. PhD in Mechanical. Applied and Computational Engineering.

INTRODUCCION

Los ensayos no destructivos son utilizados cada vez más en la inspección de productos semiacabados o acabados, para la detección de discontinuidades que pueden llegar a causar fallos catastróficos. Respecto a la defectología, caracterización y metrología de dichas discontinuidades existen cuatro etapas básicas de inspección que son: el método de la inspección, obtención de la indicación, interpretación de la indicación y evaluación de la indicación.

Para ayudar a superar estas dificultades, universidades e industria relacionada con el sector de ensayos no destructivos, han realizado varios estudios e igualmente han demostrado métodos que minimizan los errores de localización, dimensionamiento y caracterización de discontinuidades. Estos estudios se han centrado en el desarrollo de transductores avanzados y técnicas para hacer frente al problema actual. En los últimos tiempos, el desarrollo y el aumento del conocimiento de técnicas como el ultrasonido Phased Array ha tomado relevancia, ya que es una técnica que permite la inspección de discontinuidades con exactitud brindando soluciones de seguridad donde este sea aplicado. La tecnología Phased Array tiene la habilidad de modificar electrónicamente las características acústicas del palpador como ángulo, punto de salida del haz, diámetro del cristal piezoeléctrico, entre otras. Esta tecnología tiene muchas ventajas tales como una alta velocidad de barrido electrónico sin movimiento del palpador, mejora las posibilidades de inspección controlando las características del haz mediante software. El ultrasonido Phased Array ha logrado reducir los tiempos de inspección de piezas, elementos, estructuras respecto al ultrasonido convencional al contar con más elementos de inspección o haces ultrasonidos los cuales pueden ser configurados para crear un barrido amplio e ideal para cada aplicación.

1. DESCRIPCION DEL PROYECTO

1.1 IDENTIFICACION DEL PROBLEMA

La inspección y detección de fallas internas en ciertas piezas y estructuras de diversos materiales es un proceso casi imposible de definir sin el equipo y las técnicas correctas, el ojo humano no puede llegar a determinar posibles anomalías internas en los materiales producto del método de fabricación o el respectivo maquinado.

En las diversas industrias cada vez es más importante asegurar la integridad de la infraestructura (aviones, trenes, oleoductos, plataformas petrolíferas, puentes y recipientes a presión). Es importante conocer la salud estructural del material, pieza o máquina sin tener que afectar su utilidad futura, de ahí la gran importancia del uso de ensayos no destructivos como el ultrasonido, esto es necesario para reducir fallos catastróficos y mejorar en el ámbito del control de calidad de cualquier producto.

En la industria colombiana existen muchas deficiencias en cuanto a mantenimiento en las empresas. Son pocas las empresas que conocen el potencial con el que cuentan los ensayos no destructivos y del potencial pueden llegar a brindar en cuanto a seguridad y al final en reducción de costos operativos. Las empresas cada vez más tienen que lidiar con problemas de producción generados por fallos catastróficos que pueden llegar a ser evitados aplicando un correcto mantenimiento.

Es importante contar con un diagnostico confiable, como lo es la detección de fallas por ultrasonido Phased Array, que permite hacer medición de distancia, profundidad, detección de defectos y discontinuidades tanto en soldaduras como en piezas y estructuras; además de ser versátil para la adquisición de distintos datos.

Permitiendo la detección y el análisis de discontinuidades de una manera expedita y fácil de aplicar así evitando fallas catastróficas.

El reto del ingeniero mecánico es buscar nuevas técnicas y crear metodologías para la aplicación en cuanto a la detección de fallas en los materiales comerciales. Es por esto que se propone realizar una metodología para la inspección y detección de dichas fallas en placas de acero con técnicas avanzadas en el ultrasonido como la técnica Phased Array.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Establecer una metodología para la inspección y detección de fallas en placas grandes de acero (Acero 1020 y Acero inoxidable serie 300 AISI), mediante el uso de la técnica de ultrasonido Phased Array.

2.2 OBJETIVO ESPECIFICO

- Fabricar el patrón de calibración del acero 1020 y Acero inoxidable serie 300 AISI.
- Describir y establecer un protocolo para la inspección de placas de acero empleando ultrasonido Phased Array para la detección de fallas inducidas.
- Implementar las pruebas para la detección de fallas inducidas en una placa de acero 1020 para su posterior caracterización y análisis.

3. JUSTIFICACION.

El uso de ensayos no destructivos en el área de mantenimiento es cada vez más común en la industria ya que permite conocer y mejorar la seguridad de las instalaciones sin dañarlas, minimizando las paradas en la producción. Los Ensayos No Destructivos (END) son herramientas fundamentales en el Control de Calidad o Garantía de Calidad de materiales, soldaduras, equipos, piezas o partes, verificación de montajes, desarrollo de procesos y para la investigación. La mayor parte de los END se diseñan para descubrir discontinuidades, tras lo cual hay que decidir si éstos son significativos o no de acuerdo con las normas vigentes. Algunos tipos de ensayos no destructivos más utilizados son: examen visual, partículas magnéticas, tintas penetrantes, ultrasonidos (convencional, Phased Array) y técnicas radiográficas, entre otros.

Una de las técnicas más utilizadas es el ultrasonido, particularmente el Phased Array debido a que presenta cierto tipo de ventajas respecto al ultrasonido convencional y las técnicas radiográficas, permitiendo detectar grietas e imperfecciones en una fase temprana y de esta forma, proteger los activos, evitando paradas de actividad inesperadas y costosas reparaciones.

Este trabajo de grado pretende establecer una metodología que permita tomar los datos en la inspección mediante el ultrasonido Phased Array en montajes o en diferentes elementos presentes en la industria para la detección de fallas tanto en las estructuras como en las juntas de una manera más eficiente, que no sea dependiente de la actitud del técnico al momento de realizar el ensayo.

Los ensayos se realizarán en placas de Acero 1020 y Acero inoxidable serie 300 AISI implementando la metodología que se estará desarrollando mediante el uso de un equipo de ultrasonido OmniScan, un escáner y un bloque de calibración del material de la pieza a analizar para calibrar el equipo.

4. MARCO TEORICO

4.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos (END) han adquirido gran importancia en los últimos años debido a permiten realizar diversas pruebas para el monitoreo de piezas o estructuras, siendo herramientas importantes para control de calidad y la detección de fallas en fases tempranas que permitirán implementar las políticas de mantenimiento necesarias para un óptimo desempeño de una organización industrial.

Los ensayos son realizados bajo estándares normativos internacionales vigentes tales ASME, ASTM, AWS y el API. Los END pueden ser clasificados según la posición en que se encuentre la discontinuidad que se desee encontrar, por lo que se clasifican en:

- END Superficiales: Entregan información acerca de las discontinuidades superficiales en los materiales inspeccionados.
- END de Hermeticidad: Entregan información relativa del grado en que pueden ser contenidos los fluidos en recipiente sin que escapen a la atmosfera.
- END Volumétricos: Entregan información de la integridad interna de los materiales inspeccionados.

Tabla 1. Ensayos no destructivos

Clasificación de ensayos	ensayos superficiales	ensayos de hermeticidad	ensayos volumétricos
Tipo de ensayo	inspección visual	pruebas de fuga	radiografía industrial
	líquidos penetrantes	pruebas de presión	emisión acústica
	partículas magnéticas	pruebas de burbuja	ultrasonido industrial

Fuente: ROMERO REYES, Bernardo Jesus, PROBOSTE CONTRERAS, Felipe Hernán. (2013). Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura. [Tabla]. Recuperado de http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/799/1/Romero_Reyes_Bernardo.pdf

4.2 PRINCIPIOS Y CONCEPTOS BASICOS DE ULTRASONIDO

El ultrasonido son ondas acústicas, es decir, perturbaciones de tipo elástico (o mecánico), que se propagan por todos los medios materiales mediante el movimiento armónico de sus moléculas. Se llama así, porque su frecuencia de oscilación está por encima de la frecuencia de las ondas audibles, esto es, frecuencias superiores a 20kHz. El límite superior no puede determinarse pues depende de la tecnología¹.

El ultrasonido como técnica para la detección de fallas consiste en interpretar los cambios producidos en las ondas ultrasónicas a su paso por el material, permitiendo deducir las características mecánicas y/o geométricas de éste, para determinar las propiedades físicas de la producción y determinar la existencia de defectos internos, tales como poros, grietas, calidad de las uniones, entre otros.

¹ Angel César Veca; Ernesto Accolti. Ultrasonido para ingenieros y estudiantes de ingeniería. San Juan. P. 2. 2016

4.2.1 Nociones básicas. Se presentan términos que se mencionarán a lo largo del estudio y serán de gran importancia en el comportamiento de las ondas.

- **Oscilación (ciclos):** Es el cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo.
- **Onda:** Es una propagación de una oscilación y sucede cuando las partículas de un material oscilan transmitiendo su vibración a la adyacente.
- **Periodo (T):** Tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación.
- **Frecuencia (F):** número de veces que se repite un ciclo en 1s (se puede considerar la inversa del periodo). Se mide en Hz; su unidad representa un ciclo por segundo. Cuando la frecuencia de una onda sonora es superior a 20KHz hablamos de ultrasonidos, los cuales son imperceptibles para el oído humano ya que no transforma en estímulo esa vibración captada por el tímpano.
- **Amplitud (A):** Es la máxima desviación de oscilación, si esta es constante en el tiempo la oscilación se considera como subamortiguada (para materiales perfectamente elásticos), en cambio si esta decrece con el tiempo, la oscilación se considera como amortiguada, en este caso la disminución de dicha amplitud se debe a la disipación de energía (cuando los materiales no son perfectamente elásticos).
- **Amortiguación o Atenuación:** es el decremento en el tiempo de la amplitud de una oscilación.
- **Velocidad de propagación:** Es la velocidad a la que se propaga la onda que, en nuestro caso, es la velocidad del sonido (C), esta depende de las propiedades del material que hace de medio.
- **Longitud de onda (λ):** Es la distancia entre dos puntos adyacentes de condición de oscilación equivalente mirando en la dirección de propagación. Si el fenómeno se propaga con una velocidad V entonces se tiene que:

$$\lambda = V * T \quad (2.1)$$

- **Frente de onda:** Es el lugar geométrico en que los puntos del medio son alcanzados en un mismo instante por una determinada onda. Dada una onda propagándose en el espacio o sobre una superficie, los frentes de ondas pueden visualizarse como superficies o líneas que se desplazan a lo largo del tiempo alejándose de la fuente sin tocarse.

4.2.2 Impedancia acústica. La impedancia acústica (Z) es una propiedad de estado intensiva. Es la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre este, siendo igual al producto de la densidad del medio por la velocidad de la onda en dicho medio.²

$$Z = \rho \cdot V \text{ [gr/cm}^3 \cdot \text{cm/seg]} \quad (2.2)$$

Z = Impedancia acústica, gramos / cm² s.

ρ = Densidad del material, gramos / cm³.

v = Velocidad de propagación, cm / segundo.

La impedancia acústica es importante en:

- La determinación de la transmisión y reflexión acústica en la superficie de contacto de dos materiales que poseen distintas propiedades.
- El diseño de los cabezales ultrasónicos.
- Evaluación de la capacidad de absorción de sonido de un medio.

La impedancia acústica también permite calcular el porcentaje de energía teórica transmitida y reflejada en las interfaces acústicas. Entre mayor sea la diferencia de las impedancias acústicas de las interfaces, mayor será el porcentaje de reflexión.

La energía reflejada y transmitida se calcula con las ecuaciones 2.3 y 2.4

Respectivamente.

² Beranek. Leo, Mellow. Tim. Acoustics: sound fields and Transducers. Academic press. P. 14. 2012

$$R = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2 \quad \%R = R \times 100 \quad (2.3)$$

$$T = \frac{4 \cdot Z_2 \cdot Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} = 1 - R \quad \%T = T \times 100 \quad (2.4)$$

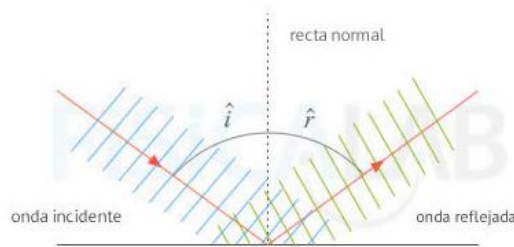
Donde: R = Coeficiente de reflexión; %R = Porcentaje de reflexión T = Coeficiente de transmisión; %T = Porcentaje de transmisión; Z1 = Impedancia acústica en el medio 1; Z2 = Impedancia acústica en el medio 2.

La reflexión teórica frecuentemente difiere de la reflexión real; la superficie rugosa es uno de las principales variables, además de la impedancia acústica.

4.2.3 Fenómenos de las ondas. Las ondas experimentan diferentes formas de propagación, es decir presenta diversos fenómenos cuando pasan de un medio a otro, por lo cual es de suma importancia detallar algunos de ellos que nos permitirán interpretar de una mejor manera el comportamiento del haz ultrasónico, se pueden considerar los siguientes:

- **Reflexión:** Este fenómeno se presenta al incidir la onda sobre una superficie de propiedades elásticas distintas al medio en que se propagan, parte de su energía es reflejada por esa superficie en dirección que forma, con la normal a la superficie, el mismo ángulo que formaba la onda incidente. Es el causante del eco en los equipos de ultrasonido.

Figura 1. Reflexión de una Onda



Fuente: FERNÁNDEZ, Jesús. (2019). Reflexión de una Onda. [Figura]. Recuperado de <https://www.fisicalab.com/apartado/reflexion-refraccion-ondas#contenidos>

- **Refracción:** La parte de la onda que no se refleja atraviesa de un medio a otro con una dirección a la de la onda incidente, pero tal que la relación entre los senos de los ángulos, respecto a la normal, que forma el rayo incidente y el que penetra sea constante.

La ley de Snell relaciona el ángulo de la onda incidente con el de la onda refractada directamente con las velocidades del sonido en ambos medios, esta se conoce como y es aplicable a todo tipo de ondas independientemente de si se está trabajando con la componente reflejada o refractada.

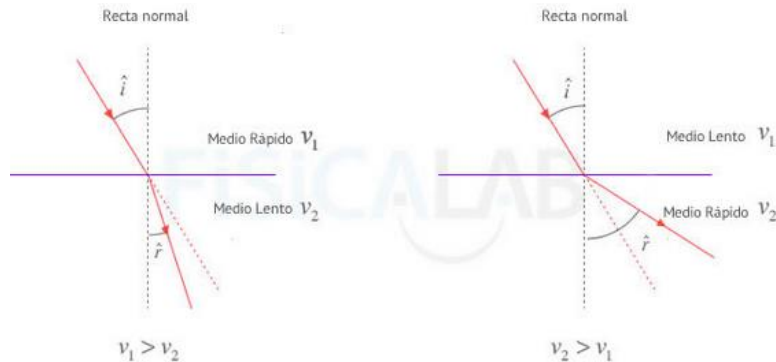
$$\frac{\text{sen}(\hat{i})}{\text{sen}(\hat{r})} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.5)$$

Donde:

- $\hat{i}$: Ángulo de incidencia de la onda incidente.
- $\hat{r}$: Ángulo de incidencia de la onda refractada.
- V_1 : Velocidad del sonido en el medio de la onda incidente.
- V_2 : Velocidad del sonido en el medio de la onda refractada.
- Para el estudio de una onda que se refleja, como el medio en el que se refleja es el mismo que el de incidencia, la relación entre los senos

de los ángulos es igual a 1, por lo que el ángulo de la onda reflejada es igual al ángulo de la onda incidente.

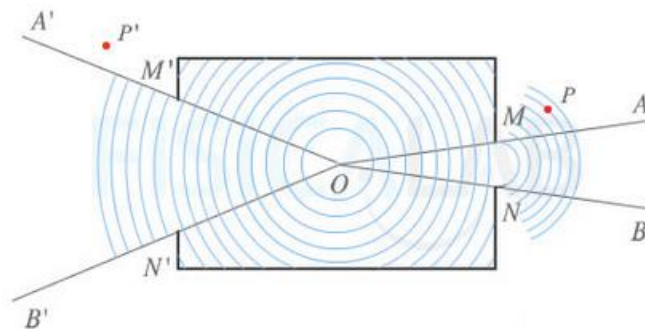
Figura 2. Refracción de una onda



Fuente: Fernández, Jesus. (2019). Refracción de una Onda. [Figura]. Recuperado de <https://www.fisicalab.com/apartado/reflexion-refraccion-ondas#contenidos>

- **Difracción:** Se observa cuándo una onda sonora incide en una abertura que posea dimensiones del orden de la longitud de onda, ciertos puntos del frente de onda pueden convertirse en fuentes secundarias de onda.

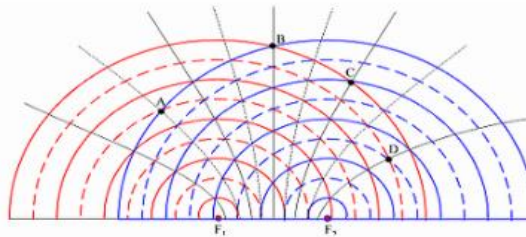
Figura 3. Difracción en una Onda



Fuente: <https://www.fisicalab.com/apartado/difraccion-ondas#contenidos>

- **Interferencia:** Cuando las ondas de sonido se originan simultáneamente desde distintos puntos, distintas fuentes, produciendo esto un solapamiento de las diferentes ondas y originando una onda resultante distinta a las originadas.

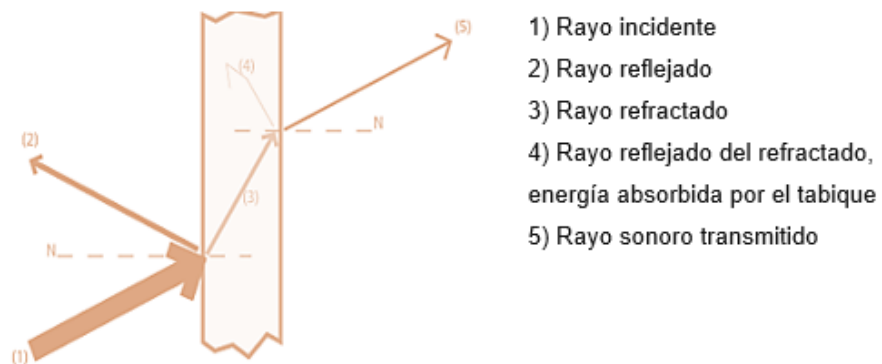
Figura 4. Interferencia en Ondas



Fuente: Intercentres Ondas. Interferencia en Ondas. Recuperado de <http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Ondas/Ondas11.htm>

- **Absorción:** Fenómeno que se presenta debido a las pérdidas por fricción que se convierten en calor cuando parte de la energía acústica disminuye. Dicha fricción interna crece con la frecuencia. En la figura 5 se representa por flechas algunos de los fenómenos que se mencionaron anteriormente que se pueden presentar en el comportamiento de una onda.

Figura 5. Absorción de una Onda.



4.2.4 Tipos de ondas ultrasónicas. La clasificación de las ondas parte desde diferentes aspectos y criterios como lo son según el movimiento de sus partículas, de acuerdo al medio en el que se propagan, según su propagación o periodicidad. En este documento se va a hacer énfasis al tipo de ondas que se presentan de acuerdo a su propagación.

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

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

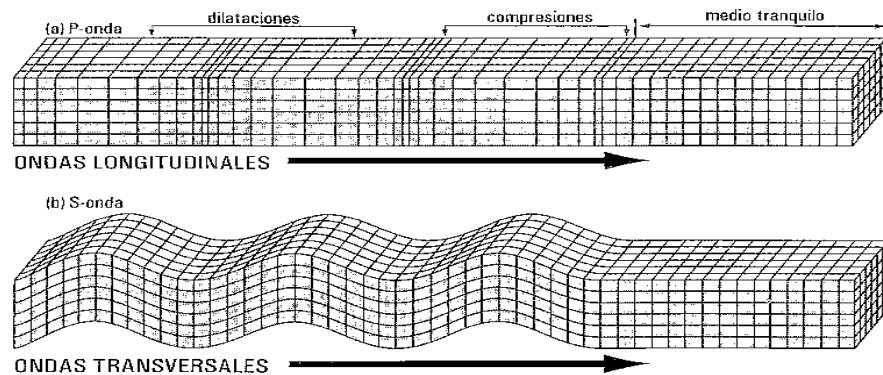
a) Ondas longitudinales o de compresión.

Son aquellas ondas en las cuales las partículas del medio material vibran paralelamente a la dirección de propagación de la onda, Ver figura 6. Las ondas longitudinales se pueden propagar en sólidos, líquidos y gases y permiten utilizarse para la medición de espesores, también se caracterizan por ser de mayor velocidad de propagación que las transversales.

b) Ondas transversales o de corte (Shear)

Son aquellas ondas en las cuales las partículas del medio material vibran perpendicular a la dirección de propagación de la onda, Ver figura 6. La velocidad de una onda transversal es aproximadamente la mitad de una onda longitudinal, lo que permite que la sensibilidad y la atenuación aumenten. Las ondas transversales se utilizan para detectar discontinuidades que no están orientadas de forma paralela a la superficie de prueba y solo pueden ser utilizadas en elementos sólidos a excepción de líquidos de alta viscosidad.

Figura 6. Ondas Longitudinales Y Ondas Transversales.



Fuente: Puntos Activos de la Tierra, Terremotos, Sismos y Fallas. [Anónimo] (2015, noviembre 12). Recuperado de <http://placasdenuestroplaneta.blogspot.com/2015/11/ondas-sismicas.html>

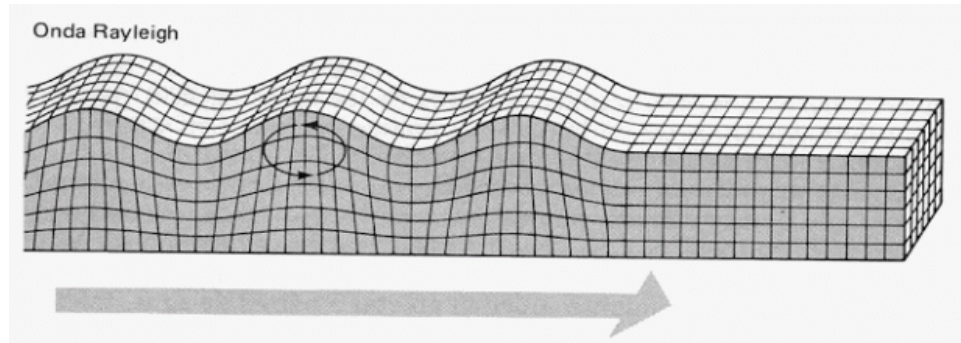
c) Ondas Rayleigh o Superficiales

Existe un tipo de ondas elásticas ultrasónicas que se propagan por el contorno de la superficie de un material y cuya penetración en éste es despreciable. Estas ondas son conocidas como ondas superficiales.

Las ondas de Rayleigh combinan una componente de onda longitudinal con una componente de onda de corte la cual es normal a la superficie. Por otra parte, las ondas de Rayleigh se producen por fuerzas que no están en equilibrio en la superficie del material, generando de esta manera un movimiento elíptico en el medio cuya amplitud disminuye exponencialmente a medida que aumenta la profundidad por debajo de la superficie. Ver figura 7.

La longitud de onda de las ondas superficiales es extremadamente corta, y el material por el cual ésta viaja es de al menos varias longitudes de onda de espesor. Debido a estas condiciones, el desplazamiento de partícula de unas pocas longitudes de onda más allá de la superficie del material es despreciable.

Figura 7. Ondas Rayleigh



Fuente: CERVANTES, Miguel. (2016). Ondas Rayleigh. [figura]. Recuperado de <https://httpfisica.wordpress.com/2016/11/03/5-1-tipos-de-ondas-mecanicas/>

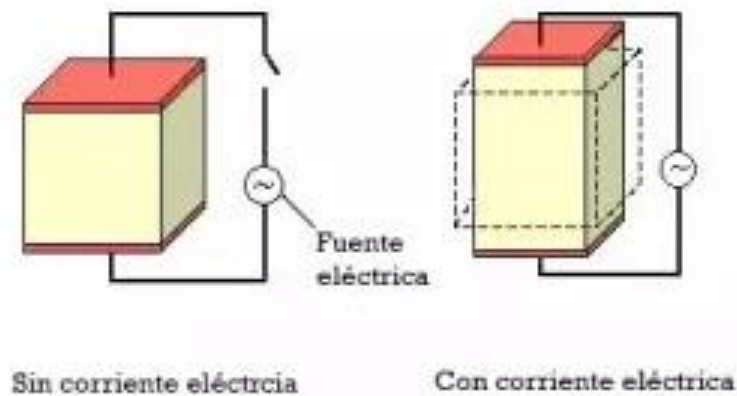
4.2.5 Generación de ultrasonido³. Cualquier objeto que vibra es una fuente de sonido; aprovechando diversos fenómenos físicos, algunos de los cuales sirven para ensayos no destructivos, dependiendo de la frecuencia requerida y del rendimiento a obtener.

Existen varios métodos los cuales son:

- **Métodos mecánicos:** Son dispositivos capaces de oscilar que se construyen de tal manera que posean una frecuencia propia correspondientemente alta. No se emplea en ensayos no destructivos.
- **Efecto magnetostrictivo:** Se denomina a la propiedad de los materiales magnéticos que hacen que estos cambien de forma al encontrarse en presencia de un campo magnético. Este efecto es recíproco, lo que permite a su vez emisión y recepción de las ondas ultrasónicas.

³ Rimoldi. Claudio, Mundo. Luis. Ensayos no destructivos. Apuntes de clase. P. 14

Figura 8.Efecto Magnetostrictivo.



Fuente MECAFENIX Fénix. (2017). Efecto Magnetostrictivo. [figura]. Recuperado de <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/magnetostriccion/>

- **Efecto Piezoeléctrico:** Este efecto es aprovechado casi universalmente para el ensayo no destructivo de materiales. Los elementos utilizados son, básicamente, una pieza de material polarizado (en cierta parte las moléculas se encuentran cargadas positivamente mientras que en otra parte las moléculas se encuentran cargadas negativamente) con electrodos adheridos a dos de sus caras opuestas.

Cuando un campo eléctrico es aplicado a lo largo del material las moléculas polarizadas se alinearán con el campo resultando un dipolo inducido en la estructura cristalina. Esta alineación de las moléculas causará un cambio dimensional, llamado electrostricción. A su vez puede darse la acción opuesta, es decir, producir un campo eléctrico cuando cambian de dimensión.

Figura 9. Efecto Piezo eléctrico



Fuente: Materiales Cerámicos. (2012). Recuperado de <https://www.ceramtec.es/materiales-ceramicos/piezoceramica/basicos/> CeramTec.

4.2.6 Técnicas de ultrasonido. Los dos métodos más importantes para la inspección por ultrasonido son el método de transmisión y el método pulso-eco. La principal diferencia entre estos dos métodos es que el método de transmisión involucra solo la medición de la atenuación de la señal, mientras que el método eco-pulso puede ser utilizado para medir el tiempo de tránsito y la atenuación o disminución de la señal.

- **Método eco-pulso:** Este método es utilizado para detectar la localización de la falla y para medir espesores. La profundidad de la falla está determinada por el "tiempo de vuelo" entre el pulso inicial y el eco producido por la falla. La profundidad de la falla también se puede determinar por el tiempo relativo de tránsito entre el eco producido por una falla y el eco de la superficie de respaldo. Las dimensiones de las fallas se estiman comparando la amplitud de la señal del sonido reflejado por una interface, con la amplitud del sonido reflejado desde un reflector de referencia de tamaño conocido o por una pieza de respaldo que no contenga fallas.
- **Método de transmisión:** El método de transmisión el cual incluye tanto reflexión como transmisión, involucra solo la medición de la atenuación o disminución de señal. Este método también se utiliza para la detección de fallas. Los ecos de las fallas no son necesarios para su detección. El hecho

de que la amplitud de la reflexión de una pieza de trabajo es menor que la de una pieza idéntica libre de fallas, implica que la pieza tiene una o más fallas. La técnica para detectar la presencia de fallas por la atenuación de sonido es utilizada en los métodos de transmisión, así como en los métodos eco-pulsados.

- **Método de frecuencia modulada:** En el método frecuencia modulada los pulsos ultrasónicos son transmitidos en paquetes de ondas en los cuales su frecuencia varía linealmente con el tiempo. El método de frecuencia modulada es un método no tan común que tiene una baja relación ruido-señal y por lo tanto una buena opción en ahorro de energía. La variación en la frecuencia es repetitiva en los paquetes de ondas sucesivos, de tal manera que si se grafica frecuencia contra tiempo se obtendrá un patrón de diente de sierra en la curva graficada. Existe un tiempo de demora entre paquetes sucesivos, los ecos que retornan se muestran o visualizan en una unidad de salida.
- **Análisis espectral:** Este método puede ser utilizado en los métodos de transmisión o eco-pulsado, involucra la determinación de un espectro de frecuencia de una onda ultrasónica después de que se ha propagado a través de la pieza. Los análisis espectrales pueden ser utilizados para medir especímenes de espesores delgados.
- **Conducción de sonido:** Es utilizado en la detección de fallas por el monitoreo de la intensidad de formas de ondas arbitrarias en un punto determinado de la pieza a inspeccionar. Estas ondas transmiten energía ultrasónica las cuales son alimentadas a la pieza en algún otro punto sin la existencia de un patrón de haz bien definido entre los dos puntos.

4.3 ULTRASONIDO MEDIANTE LA TECNICA PHASED ARRAY

Los sistemas Phased Array (arreglo de fase) por ultrasonidos pueden emplearse potencialmente en casi cualquier prueba en la que tradicionalmente se utilizaban detectores de fallas por ultrasonidos convencionales. Las inspecciones de soldadura y la detección de grietas son las aplicaciones más importantes, y estas pruebas se realizan en una amplia gama de industrias tales como la aeronáutica, la generación de energía, la petroquímica, proveedores de productos tubulares, entre otros. Los transductores de ultrasonido convencionales para ensayos no destructivos comúnmente consisten en un único elemento activo, que tanto genera como recibe ondas de sonido de alta frecuencia, o dos pares de elementos, uno para transmitir y otra para recibir.

Los palpadores o transductores de Phased Array, por lo general constan de un transductor con un conjunto de 16 hasta un máximo de 256 elementos individuales, los cuales pueden oscilar cada uno por separado para crear pulsos independientes. Estos comúnmente están dispuestos en una matriz lineal. Como es el caso de los transductores convencionales, los palpadores Phased Array pueden ser diseñados para su uso en contacto directo, como parte de un conjunto de haz angular con una cuña (zapata), o para el uso de inmersión con acoplamiento del sonido a través de una columna de agua. Las frecuencias del transductor son comúnmente usadas en el intervalo de 2 MHz a 10 MHz.

Un sistema de Phased Array, también incluye un sofisticado instrumento informático que es capaz de controlar las ondas de ultrasonido producidas por múltiples elementos (ver figura 10), la recepción y la digitalización de los ecos de respuesta al interactuar con un reflector, así como la reproducción de esta información en varios formatos estándar. ⁴

⁴ Olympus. Phased Array Testing: basic Theory for Industrial Applications.p7.2017

Figura 10. Olympus MX2



Fuente: OLYMPUS. (2012). Detectores de defectos. Recuperado de [https://www.olympus-ims.com/es/omniscan-mx2/#!/cms\[tab\]=%2Fomniscan-mx2%2Foverview](https://www.olympus-ims.com/es/omniscan-mx2/#!/cms[tab]=%2Fomniscan-mx2%2Foverview)

A diferencia de detectores de fallas convencionales, los sistemas Phased Array pueden barrer un haz de sonido a través de una gama de ángulos refractados a lo largo de una trayectoria lineal, o dinámicamente centrarse en un número de diferentes profundidades, lo que aumenta la flexibilidad y la capacidad de las configuraciones para la inspección. (Olympus NDT, 2012)

En la Figura 11 se observa el proceso del ultrasonido convencional comparado con funcionamiento básico de la técnica de Phased Array.

Figura 11. Ultrasonido convencional vs Ultrasonido Phased Array

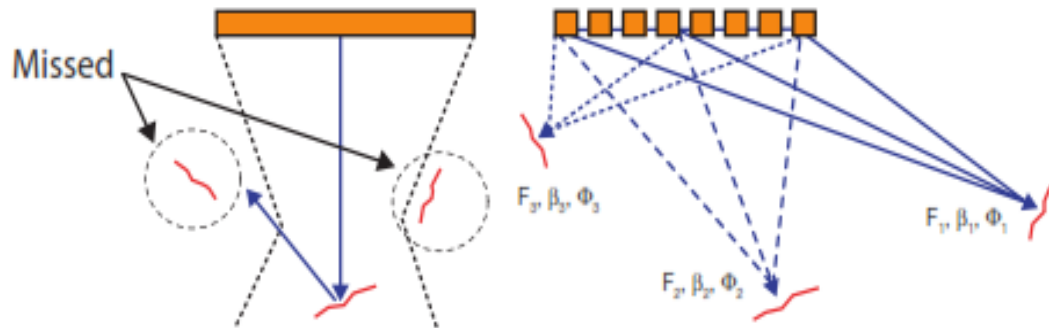


Fuente: OLYMPUS. (2012). Ultrasonido Phased Array. Recuperado de [https://www.olympus-ims.com/es/omniscan-mx2/#!/cms\[tab\]=%2Fomniscan-mx2%2Foverview](https://www.olympus-ims.com/es/omniscan-mx2/#!/cms[tab]=%2Fomniscan-mx2%2Foverview)

4.3.1 Principio de funcionamiento del Phased Array. En el sentido más básico, un sistema de Phased Array (arreglo de fase) utiliza el principio de la física de eliminación gradual de la onda, variando el tiempo entre una serie de impulsos ultrasónicos salientes, de tal manera que los frentes de onda individuales generados por cada elemento de la matriz se combinan entre sí para añadir o cancelar la energía de forma predecible que orientan y dan forma al haz de sonido con eficacia.

La característica principal de la tecnología ultrasónica Phased Array (arreglo de fases) es la excitación controlada por computadora (amplitud y retardo) de elementos individuales en una sonda múltiplemente. La excitación de los elementos piezo-compuestos puede generar haces enfocados por ultrasonidos con la posibilidad de modificar los parámetros del haz, como el ángulo, la distancia focal y el tamaño del punto focal a través del software. El haz de barrido está enfocado y puede detectar de modo especular las grietas orientadas a fallas. Estas grietas se pueden ubicar al azar alejadas del eje inspección, con una sola sonda de cristal, con movimiento y ángulo de haz limitados, hay altas probabilidades de que falten grietas orientadas a fallas, o grietas ubicadas lejos del eje del haz (ver figura la Figura 12).

Figura 12. Detección de fisuras mal orientadas por sondas mono cristalinas (izquierda) y detección de fisuras a través del multielemento (derecha).



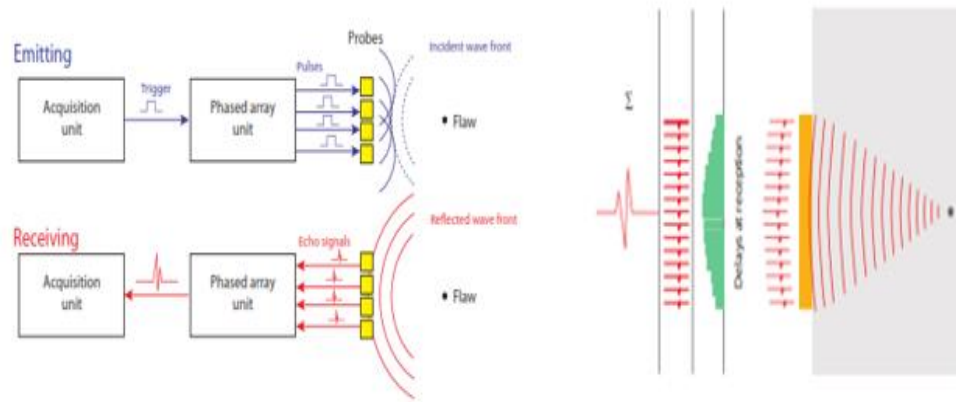
Fuente: OLYMPUS. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Disponible en [https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search\[expand\]=1](https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search[expand]=1)

Para generar un haz en fase y con una interferencia constructiva, los diversos elementos de la sonda activa se pulsan en momentos ligeramente diferentes, Como se muestra en la Figura 13, el eco del punto focal deseado golpea los diversos elementos del transductor con un cambio de tiempo computable. Las señales de eco recibidas en cada elemento del transductor se desplazan en el tiempo antes de sumarse. La suma resultante es una exploración A que enfatiza la respuesta del punto focal deseado y atenúa otros ecos de otros puntos en el material.

- Durante la transmisión, el instrumento de adquisición envía una señal de activación al instrumento de matriz en fase. Este último convierte la señal en un pulso de alto voltaje con un retraso y un ancho de tiempo pre programados definidos en las leyes focales. Cada elemento recibe un solo pulso. Esto crea un haz con un ángulo específico y enfocado a una profundidad específica. El rayo golpea el defecto y rebota.

- Las señales se reciben, luego se cambian de tiempo de acuerdo con la ley focal de recepción. Luego se reúnen para formar un solo pulso ultrasónico que se envía al instrumento de adquisición.

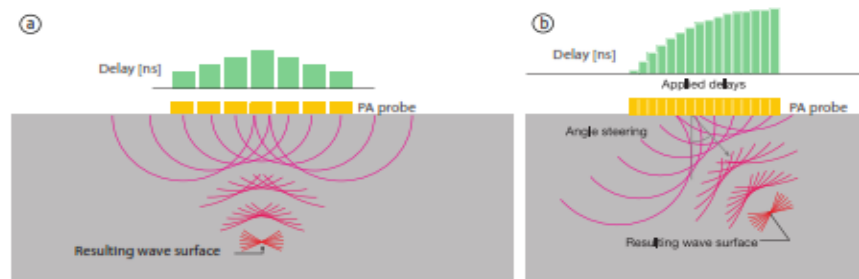
Figura 13. Formación del haz y retardo de tiempo para la pulsación y recepción de haces múltiples (misma fase y amplitud)



Fuente: OLYMPUS. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Disponible en [https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search\[expand\]=1](https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search[expand]=1)

El principio de enfoque del haz para incidencias normales e incidencias angulares se muestra en la figura 14

Figura 14. Principio de enfoque del haz a) incidencia normal b) incidencia angular

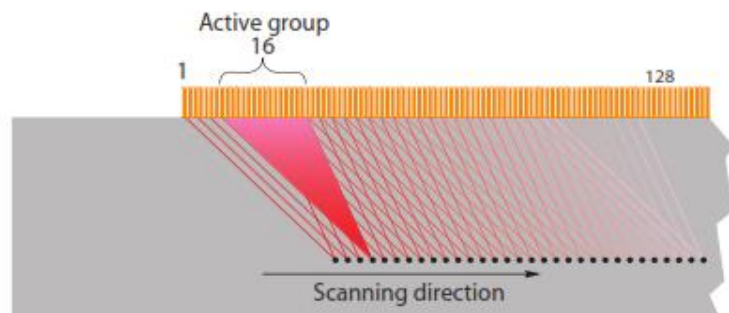


Fuente: OLYMPUS. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Disponible en [https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search\[expand\]=1](https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search[expand]=1)

La ley focal. Para obtener una interferencia constructiva en la región deseada de la pieza de prueba, cada elemento individual de la apertura de la sonda virtual de la matriz en fase debe ser controlado por computadora para una secuencia de disparo utilizando una ley focal. (Una ley focal es simplemente un archivo que contiene elementos que deben activarse, amplitudes, retrasos, entre otros parámetros del haz de ultrasonido) El retraso en cada elemento depende de la configuración de la inspección, el ángulo de la dirección, la cuña, el tipo de sonda, solo para mencionar algunos de los factores importantes.

Cuando se procesa mediante el software del equipo, cada ley focal devuelta representa la reflexión desde un componente angular particular del haz, un punto particular a lo largo de una trayectoria lineal y / o una reflexión desde una profundidad focal particular. La información de eco puede mostrarse en cualquiera de los varios formatos estándar.

Figura 15. Grupo Activo Phased Array

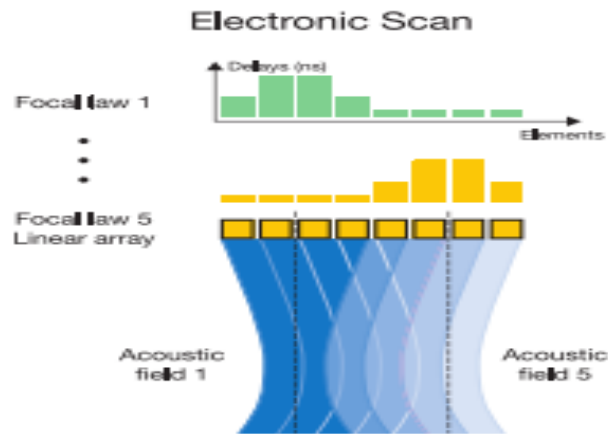


Fuente: OLYMPUS. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Disponible en [https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search\[expand\]=1](https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search[expand]=1)

Principales patrones de escaneo. El valor de retardo de cada elemento depende de la apertura del elemento activo de la sonda de matriz en fase, el tipo de onda, el ángulo refractado y la profundidad focal. Hay tres patrones principales de exploración de haz controlados por computadora:

- **Escaneo electrónico:** (también llamado E-scan, y originalmente llamado escaneo lineal): la misma ley focal y retardo se multiplexan en un grupo de elementos activos (consulte la Figura 16); la exploración se realiza a un ángulo constante y a lo largo de la longitud de la sonda de la matriz en fase por un grupo de elementos activos, llamado apertura de la sonda virtual (VPA). Esto es equivalente a un transductor de ultrasonidos convencional que realiza una inspección de onda de corte de una soldadura. Si se utiliza una cuña en ángulo, las leyes focales compensan los diferentes retrasos de tiempo dentro de la cuña.

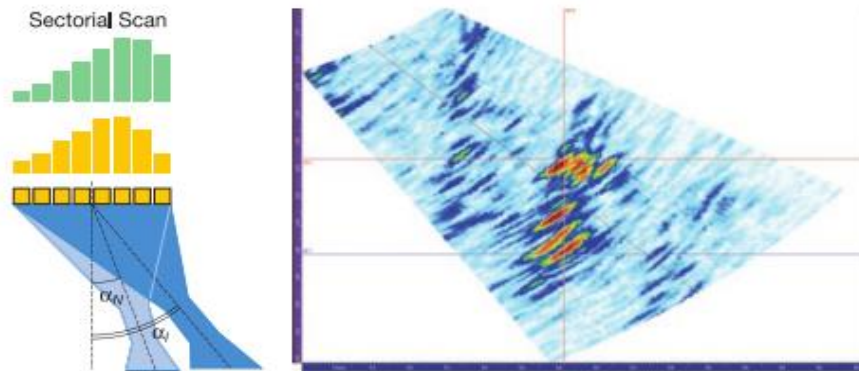
Figura 16. Escaneo Electrónico



Fuente: OLYMPUS. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Disponible en [https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search\[expand\]=1](https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search[expand]=1)

- **Escaneo sectorial:** (también llamada escaneo azimutal o angular): el haz se mueve a través de un rango angular para una profundidad focal específica, utilizando los mismos elementos. Se pueden agregar otros rangos de barrido con diferentes profundidades focales; los sectores angulares podrían tener diferentes valores de barrido (figura 17). El rango de ángulo de inicio y acabado depende del diseño de la sonda, la cuña asociada y el tipo de onda; El rango es dictado por las leyes de la física.

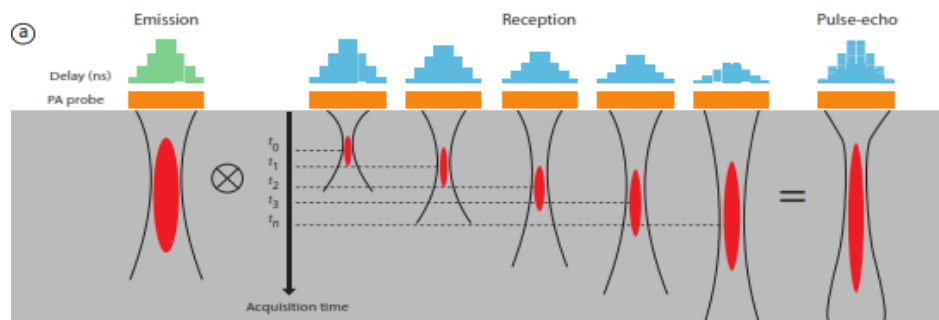
Figura 17. Escaneo Sectorial



Fuente: OLYMPUS. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Disponible en [https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search\[expand\]=1](https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search[expand]=1)

Enfoque dinámico en profundidad (DDF por sus siglas en inglés). la exploración se realiza con diferentes profundidades focales. En la práctica, se utiliza un solo pulso enfocado transmitido, y se realiza un reenfoque en la recepción para todas las profundidades programadas.

Figura 18. Enfoque dinámico en profundidad



Fuente: Olympus. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Disponible en [https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search\[expand\]=1](https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search[expand]=1)

4.3.2 Características de los palpadores Phased Array. De forma sencilla se puede pensar en un palpador Phased Array como una serie de elementos individuales en un solo paquete (figura 19). Cada uno los elementos son mucho más pequeños que los transductores convencionales, pero estos elementos pueden ser pulsados como un grupo, para así generar frentes de onda direccionalmente controlables. Este haz electrónico permite programar y analizar múltiples zonas de inspección a muy altas velocidades sin movimiento de la sonda.

Figura 19. Elementos Palpadores Phased Array



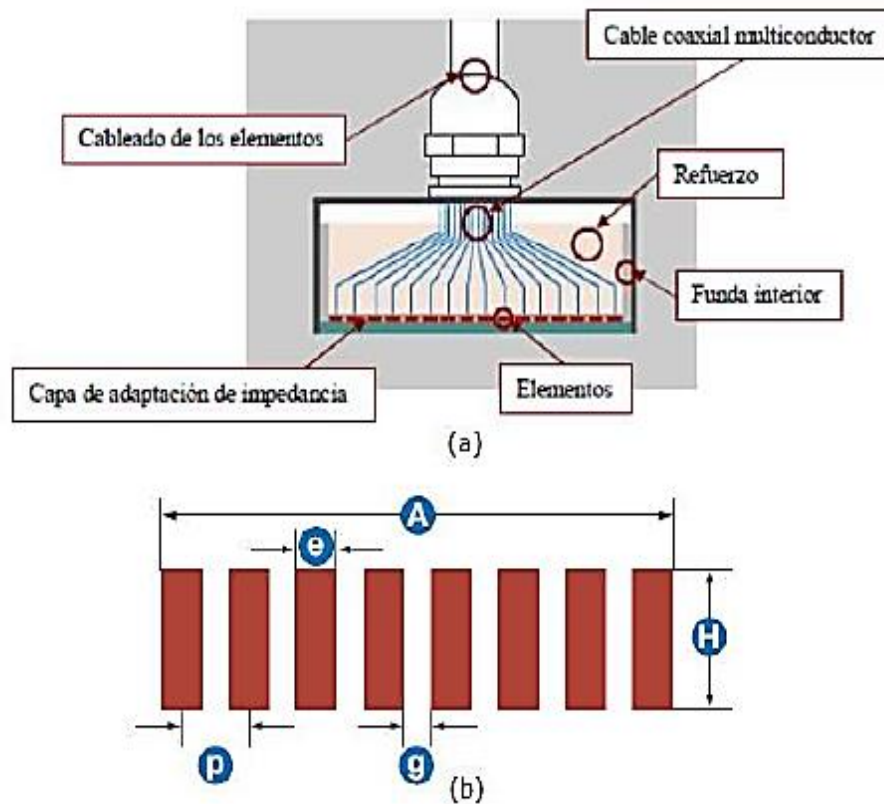
Fuente: OLYMPUS. (2012). Ultrasonido Phased Array. Recuperado de [https://www.olympus-ims.com/es/omniscan-mx2/#!/cms\[tab\]=%2Fomniscan-mx2%2Foverview](https://www.olympus-ims.com/es/omniscan-mx2/#!/cms[tab]=%2Fomniscan-mx2%2Foverview)

Los palpadores de Phased Array vienen en una amplia gama de tamaños, formas, frecuencias y número de elementos, pero lo que todos tienen en común es un elemento piezoeléctrico que se ha dividido en un número de segmentos. El laminado del metal segmentado se utiliza para dividir la banda compuesta en un número de elementos eléctricamente separados que se puede pulsar de forma individual. Este elemento segmentado se incorpora luego en un conjunto de palpadores que incluye una capa protectora, un respaldo, las conexiones de cable, y una carcasa (ver figura 2.20 a), mientras que en la figura 20 b nos detalla cada uno de los elementos de un piezo eléctrico.

Existe una amplia gama de transductores para inspección mediante Phased Array que dependerá de la aplicación a la cual vaya a ser sometida la inspección las cuales pueden ser soldadura, corrosión, elementos compuestos, inmersión, penetración profunda, como también dependerán si la inspección será manual o automatizada. Las sondas Olympus cuentan con una nomenclatura característica

como se puede ver en la figura 21, las cuales indican desde la frecuencia máxima hasta el tipo de conector al que corresponde.

Figura 20. Vista de Corte sonda Phased Array



A = apertura total o número de elementos activos

H = altura del elemento o elevación.

p = paso, o distancia de centro a centro entre dos elementos consecutivos

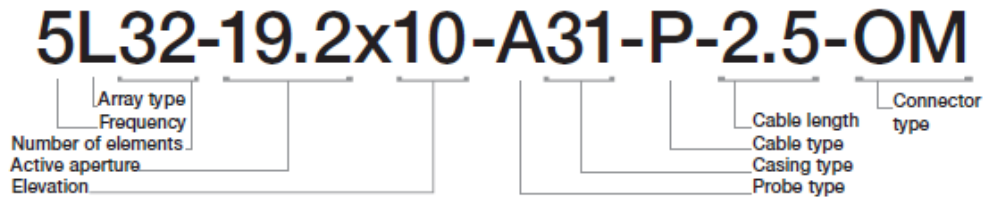
e = ancho de un elemento individual

g = espaciamiento entre elementos activos

Fuente: OLYMPUS. (2014). Ultrasonido Phased Array. Recuperado de [https://www.olympus-ims.com/es/omniscan-mx2/#!/cms\[tab\]=%2Fomniscan-mx2%2Foverview](https://www.olympus-ims.com/es/omniscan-mx2/#!/cms[tab]=%2Fomniscan-mx2%2Foverview)

Figura 21. Nomenclatura usada en sondas Phased Array estándar

Numbering System Used to Order Standard Phased Array Probes



Glossary Used to Order Phased Array Probes (typical options shown)

Frequency 1.5 = 1.5 MHz 2.25 = 2.25 MHz 3.5 = 3.5 MHz 5 = 5 MHz 7.5 = 7.5 MHz 10 = 10 MHz Additional frequencies available upon request	Number of elements Example: 16 = 16 elements	Casing type Casing type for a given probe type
Array type L = Linear A = Annular M = Matrix probe (1.5D, 2D) CV (ROC) = Convex in azimuth CC (ROC) = Concave in azimuth CCEV (ROC) = Elevation focused ROC: radius of curvature (mm)	Active Aperture Active aperture in mm. Refer to page 6 for details.	Cable type P = PVC Sheathing M = Metal Armor Sheathing HF = Halogen-Free Sheathing HT150 = High-Temperature Cable rated to 150°C
Prefix Before Array Type D = Dual Array T = Tri Array Q = Quad Array Example DL = Dual Linear Array	Elevation Elevation in mm Example: 10 = 10 mm	Cable length Cable length in m 2.5 = 2.5 m 5 = 5 m 7.5 = 7.5 m 10 = 10 m Alternate cable lengths are available
	Probe type A = Angle beam with external wedge NW = Near-wall PWZ = Weld Inspection angle beam W = Angle beam with integrated wedge I = Immersion DGS = DGS Inspection/Atlas (AVG probe) AWS = AWS Inspection	Connector type OM = OmniScan® connector HY = Hypertronics connector OL = OmniScan Connector with conventional UT channel on element 1 (LEMO 00 connector) Connectors to computer instruments or custom connectors are available upon request.
	Housing Prefix C = Contact Matching Layer	

Fuente: OLYMPUS. (2012). Nomenclatura Sondas. Recuperado de <https://www.olympus-ims.com/es/probes/>

4.3.3 Características de zapatas en Phased Array. Al igual que en el ultrasonido convencional el transductor tiene que ser incorporado a una cuña de plástico denominada zapata, la misma que ayuda a establecer el ángulo de incidencia refractado del haz ultrasónico, a tener una mejor fijación con el material a inspeccionar y poder realizar una inspección angular. Las zapatas en los sistemas Phased Array cumplen la misma función que en los sistemas convencionales y adicionalmente ayudan en la creación de los haces en múltiples ángulos en una sola

zapata. Las zapatas de Phased Array vienen en muchos tamaños y estilos (figura 22). Algunos de ellos incorporan agujeros de alimentación para el acoplante.

Figura 22. Sondas Olympus Phased Array



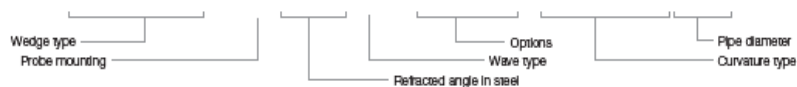
Fuente: OLYMPUS. (2017). Nomenclatura Sonatas. Recuperado de <https://www.olympus-ims.com/es/probes/wedges/>

Cada zapata Olympus cuentan con una nomenclatura característica como se muestra en la imagen 2, en esta nomenclatura podemos encontrar el tipo de zapata, como está montada la zapata, el tipo de ondas con la que trabaja y diferentes opciones dependiendo de la aplicación.

Figura 23. Nomenclatura Usada en Zapatas Olympus Estándar

Numbering System Used to Order Wedges for Angle Beam probes

SA31-N55S-IHC-AOD16



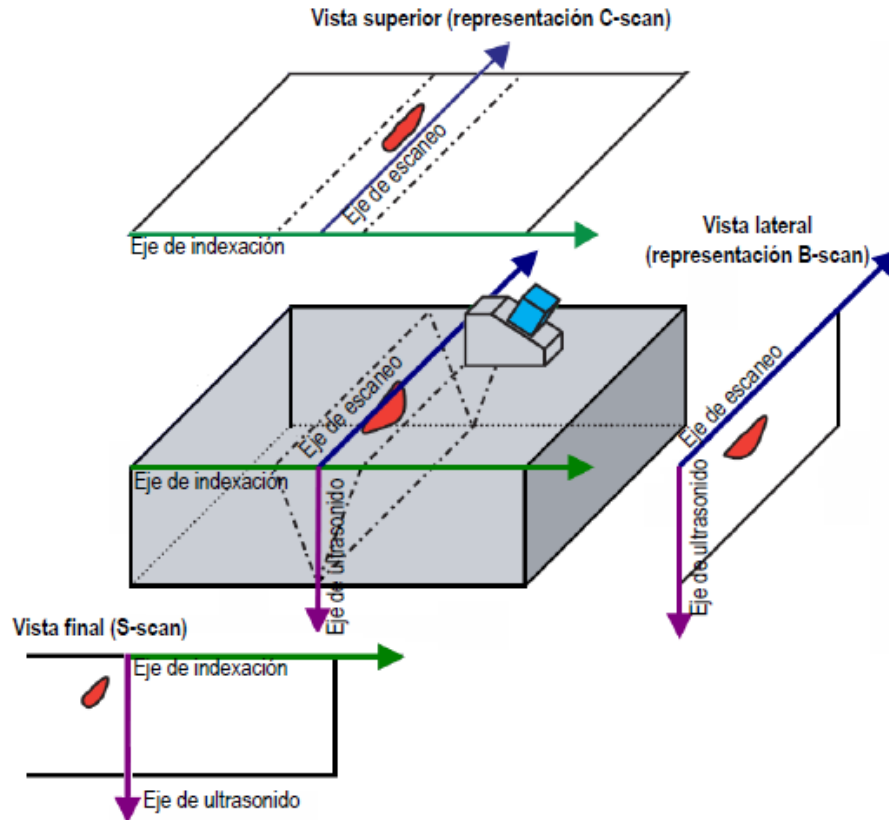
Glossary Used to Order Wedges

Wedge type SA = wedge for probe type A SAWS = wedge for probe type AWS SNW = wedge for near-wall probe type NW SPWZ = wedge for PipeWIZARD probe type PWZ	Wave type S = shear wave L = longitudinal wave
Probe mounting N = Normal L = Lateral (90° skew) DN = Dual Normal	Options IHC = Irrigation, scanner holes, and carbide wear pins IHC-C = Irrigation, scanner holes, and composite wear pins IHS = Irrigation, scanner holes, and stainless steel frame
Refracted angle in steel 0 = 0° 55 = 55° 80 = 80°	Curvature type AOD = axial outside diameter (circumferential scan) COD = circumferential outside diameter (axial scan)
	Pipe diameter Measured external pipe diameter (inches)

Fuente: OLYMPUS. (2012). Nomenclatura Zapatas. Recuperado de <https://www.olympus-ims.com/es/probes/wedges/>

4.3.4 Representación de las vistas del ultrasonido Phased Array.

Figura 24. Representación Vistas ultrasonido Phased Array

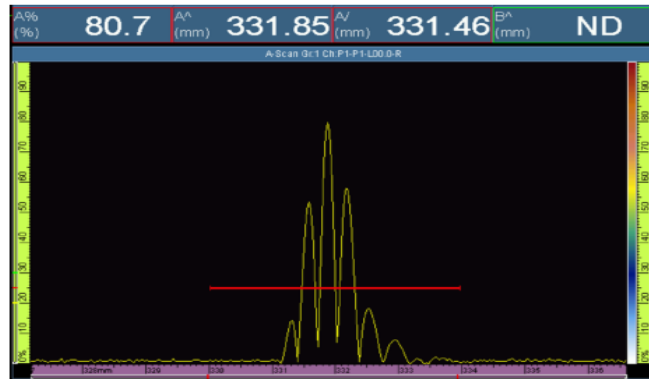


Fuente: OLYMPUS. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Disponible en [https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!/search\[expand\]=1](https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!/search[expand]=1)

En la figura 24 se muestra como es la representación de algunos de los escáneres presentes en el ultrasonido Phased Array cuando se realiza la inspección sobre una placa y como serían las vistas a través de cada uno de los ejes, mientras que la figura 25 nos indica representaciones de algunas de las vistas a través del display del OmniScan MX2 con algunas reglas o escalas.

A-scan. Es el escaneo de base para los demás escaneos. El A-scan es una representación de la amplitud del impulso de ultrasonido, recibido en función del tiempo de vuelo (trayectoria de ultrasonido). Un pico en la señal corresponde con un eco de un reflector o una discontinuidad en la pieza. Los picos al inicio o al final del eje de ultrasonido generalmente corresponden con los ecos de entrada en la superficie de la pieza y los ecos de fondo. La barra roja en la pantalla es una puerta que selecciona una parte del tren de ondas para el análisis, típicamente la medición de la amplitud y / o la profundidad del eco.

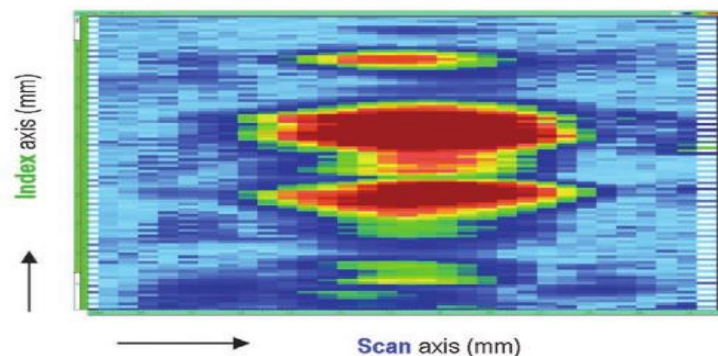
Figura 26. Representación A-scan



Fuente: OLYMPUS. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Disponible en [https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search\[expand\]=1](https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search[expand]=1)

C-scan. Es una representación bidimensional de la parte superior de la pieza que muestra los datos de ultrasonido en las puertas con la longitud del escaneo sobre un eje, y la longitud de índice sobre el otro eje. Uno de los parámetros disponibles (por ejemplo, la amplitud máxima) es proyectado en el plan de escaneo-indexación para cada punto (pixel).

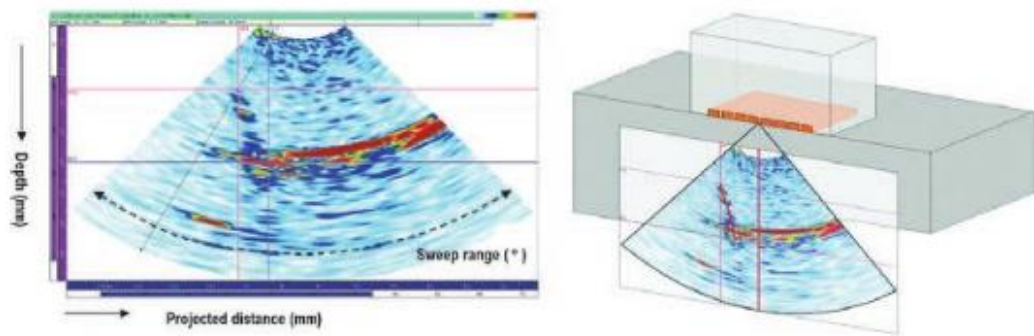
Figura 27. Representación C-scan



Fuente: OLYMPUS. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Disponible en [https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search\[expand\]=1](https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search[expand]=1)

S-scan. Es una representación bidimensional de los datos que muestran todos los A-scan generados por las leyes focales en un sector angular o en un rango de barrido para crear una sección transversal de la pieza. Los A-scan son representados por líneas donde la amplitud se dota de un código cromático, estos son corregidos según la profundidad de retardo y la profundidad real para que las posiciones sean relativas al eje de ultrasonido.

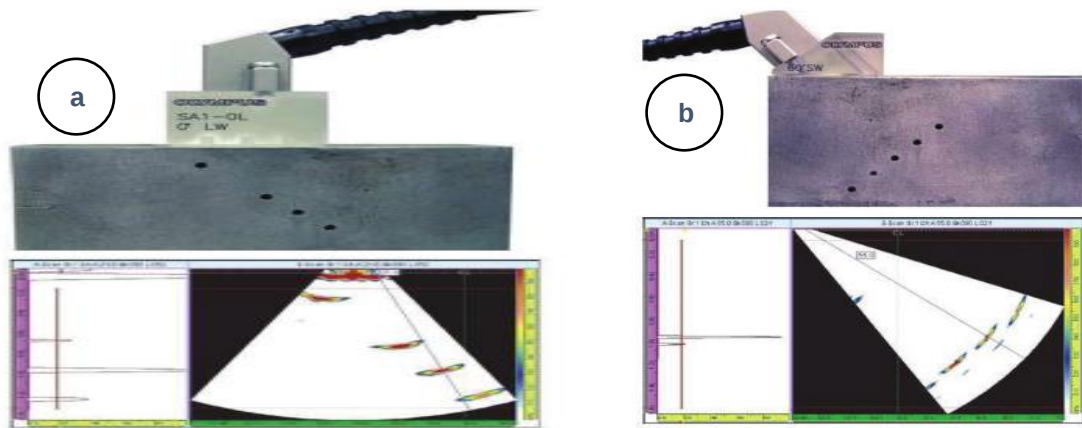
Figura 28. Representación S-scan



Fuente: OLYMPUS. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Disponible en [https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search\[expand\]=1](https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search[expand]=1)

Hay dos formas principales que se utilizan normalmente; la más familiar y común se presenta en las imágenes médicas, donde se utiliza una interfaz de la zapata de cero grados para dirigir las ondas longitudinales, creando una imagen en forma de pastel laminar y mostrando ligeramente defectos en ángulo (figura 29-a).

Figura 29. Vistas del S-can para inspecciones con incidencia normal(a) incidencia angular (b) incidencia sectorial



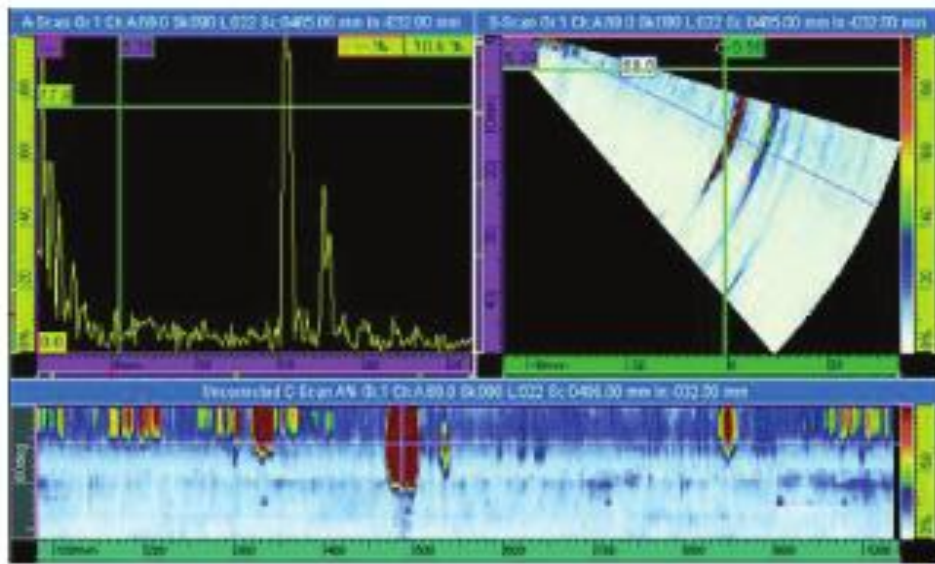
Fuente: OLYMPUS. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Disponible en [https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search\[expand\]=1](https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search[expand]=1)

La segunda forma utiliza una cuña de plástico para aumentar el ángulo incidente del haz y generar ondas de corte, frecuentemente el rango del ángulo refractado es de 30 a 70 grados. Esta técnica es similar a una inspección con haz angular convencional, excepto que los barridos del haz son a través de una gama de ángulos en lugar de un ángulo fijo determinado por una zapata. Como en un escaneo sectorial lineal, la presentación de la imagen es una imagen en sección transversal de la zona inspeccionada de la pieza de ensayo (figura 29-b).

Formatos combinados. Las imágenes con Phased Array tienen gran alcance en su capacidad para proporcionar una visualización en tiempo real de los datos volumétricos. A través del proceso de barrido electrónico la formación de imágenes llega a ser en tiempo real y se utiliza en ambos sistemas manuales y automatizados para aumentar la probabilidad de detección. En instrumentos con Phased Array automatizados, la capacidad de mostrar múltiples tipos de imagen y almacenar información de la forma de onda completa para toda la inspección, permite el análisis post-exploración de los resultados de la inspección. Debido a que todos los

datos de la forma de la onda ultrasónica se recogen, este post-análisis permite la reconstrucción de escaneos sectoriales, C-Scan, y / o B-Scan con la información correspondiente de las A-Scan, en cualquier lugar de inspección. Por ejemplo, la pantalla de la figura 30 muestra simultáneamente la forma de onda rectificada A-Scan, un análisis del sector y una imagen plana C-Scan del perfil de soldadura.

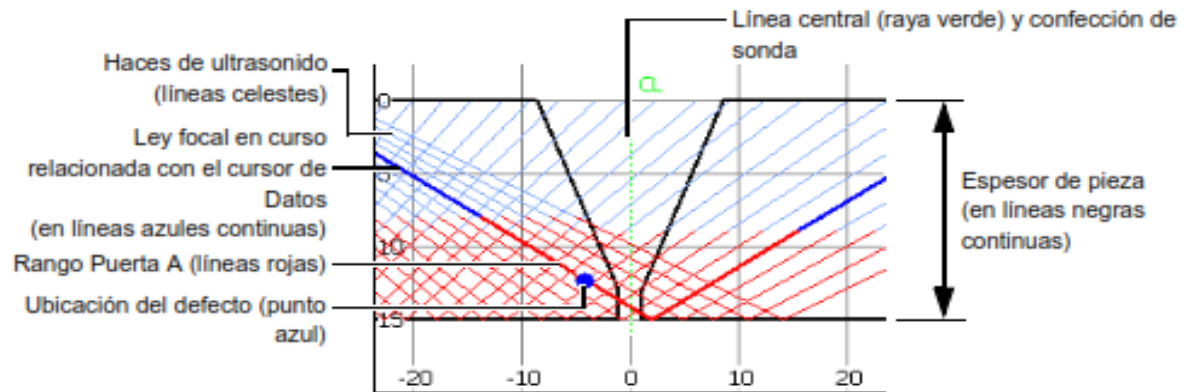
Figura 30. Múltiples vistas sistema Phased Array



Fuente: OLYMPUS. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Disponible en [https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search\[expand\]=1](https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search[expand]=1)

Representación Ray Tracing (OmniScan mx2). Es una ilustración dinámica que nos permite observar características del elemento a inspeccionar como la ubicación de los defectos en la pieza sobre el cordón de soldadura y parámetros del ultrasonido como lo son la propagación de los haces y los límites de la puerta en el A-scan.

Figura 31. Representación dinámica Ray-Tracing

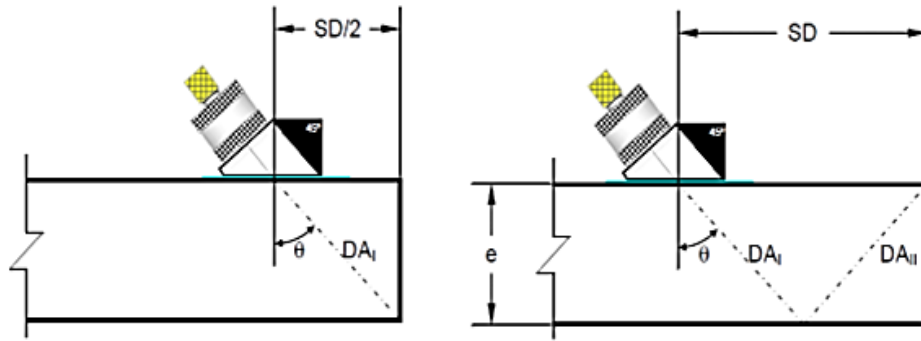


Fuente: OLYMPUS. Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications. Disponible en [https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search\[expand\]=1](https://www.olympus-ims.com/es/resources/738-search-resourcecontenttype.Books_738-search-submit.1.html#!search[expand]=1)

Esta representación nos permite visualizar una pieza y resaltar dinámicamente el reflector más potente durante la inspección, indicando con un punto azul a la ubicación con la señal más intensa y una línea continua para la ley asociada.

4.3.5 Localización de discontinuidades. Se conoce como “primera pierna”, la distancia DA_i , (ver figura 32), el recorrido del haz hasta la superficie inferior de la placa, y segunda pierna DA_{ii} , el recorrido del haz desde la superficie inferior de la placa hasta la superficie superior de la placa

Figura 32. Distancia de medio salto y un salto



Fuente: ROMERO REYES, Bernardo Jesus, PROBOSTE CONTRERAS, Felipe Hernán. (2013).

Distancia de medio salto y un salto [Figura]. Recuperado de

http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/799/1/Romero_Reyes_Bernardo.pdf

Teniendo en cuenta el ángulo theta de cada zapata (en este caso 36°), y el espesor de la placa, se pueden calcular tanto el salto como el medio salto utilizando la ecuación 2.6.

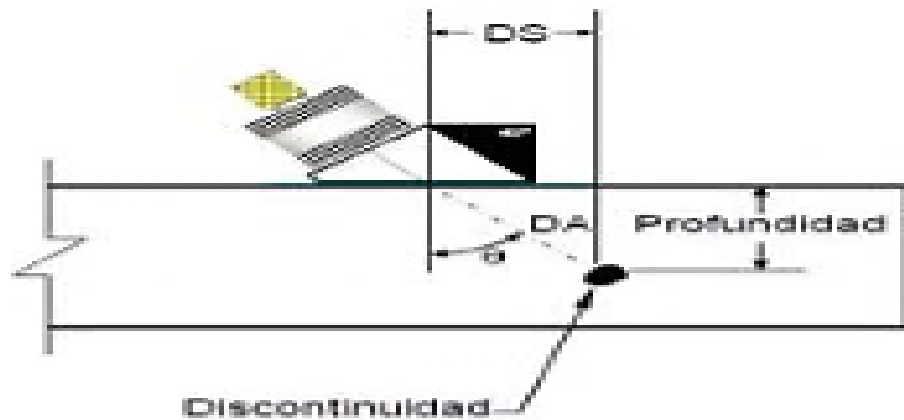
$$\tan \theta = \frac{SD/2}{e} \quad (2.6)$$

Así, despejando se tiene (2.7):

$$\frac{SD}{2} = e * \tan \theta \quad \text{Despejando} \quad SD = 2 * e * \tan \theta \quad (2.7)$$

Con la correcta calibración del palpador y la zapata, al realizar la inspección, la ubicación de las discontinuidades es presentada en la pantalla del OmniScan MX2, así mismo, dicha ubicación se puede hallar matemáticamente.

Figura 33. Discontinuidad detectada



Fuente: ROMERO REYES, Bernardo Jesus, PROBOSTE CONTRERAS, Felipe Hernán. (2013). Discontinuidad detectada. [figura] Recuperado de http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/799/1/Romero_Reyes_Bernardo.pdf

Teniendo en cuenta la figura 33, se plantean las ecuaciones (2.8) y (2.9)

$$\sin \theta = \frac{DS}{DA} \quad (2.8)$$

$$\cos \theta = \frac{Profundidad}{DA} \quad (2.9)$$

Despejando se obtiene (2.9) y (2.10)

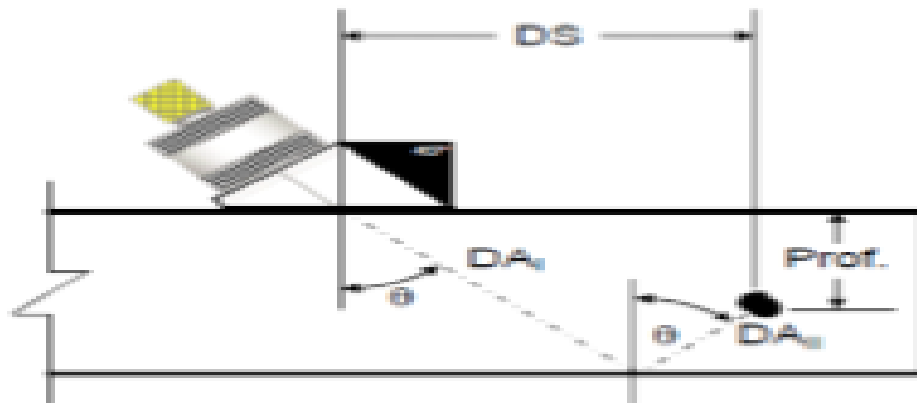
$$DS = DA * \sin \theta \quad (2.10)$$

$$Profundidad = DA * \cos \theta \quad (2.11)$$

Dónde: DS: distancia superficial; DA: distancia angular; θ : ángulo de refracción

Lo anterior si la discontinuidad se encuentra en la primera pierna; si la discontinuidad se encuentra en la segunda pierna (figura 34), la distancia angular DA mostrada en la pantalla del equipo es mayor, por lo tanto, matemáticamente queda:

Figura 34. Discontinuidad en segunda pierna.



Fuente: ROMERO REYES, Bernardo Jesus, PROBOSTE CONTRERAS, Felipe Hernán. (2013). Discontinuidad en segunda pierna. [figura] Recuperado de http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/799/1/Romero_Reyes_Bernardo.pdf

Con base en las ecuaciones anteriores, se tiene (2.10) y (2.12):

$$DS = DA * \sin \theta \quad (2.10)$$

$$Profundidad = 2 * e (DA_I + DA_{II}) * \cos \theta \quad (2.12)$$

De (2.10) y (2.12) se obtiene (2.13)

$$Profundidad = 2 * e - (DA_t * \cos \theta) \quad (2.13)$$

Dónde: DS: distancia superficial; DA: distancia angular (\$DA_i\$); \$DA_t\$: distancia total angular (\$DA_i + DA_{ii}\$); \$\theta\$: ángulo de refracción.

Así, la profundidad a la que se encuentra una discontinuidad depende de la “pierna” con la que fue detectada.

4.4 CALIBRACIÓN EQUIPOS DE ULTRASONIDO

Para la calibración de los sistemas ultrasónicos, se utilizan bloques o probetas del material a inspeccionar con discontinuidades inducidas los cuales son usados para dos propósitos

- Determinar las características de operación del instrumento y el palpador.
- Para establecer y reproducir los ecos de indicación de respuestas del instrumento.

Por lo cual se utilizan dos diferentes tipos de bloques

Bloque de Calibración: son bloques utilizados para determinar las características de operación de un equipo ultrasónico o para establecer una reproducción de las condiciones del ensayo.

Bloque de referencia: usados para compararla altura de un eco de discontinuidad o la ubicación de la discontinuidad en la pieza de ensayo, con respecto a discontinuidad inducida en el bloque especial.

Para la calibración de equipos de ultrasonido existen diferentes bloques de referencia normalizados:

- **Serie ASTM bloques área –amplitud y distancia – amplitud.**

Es una combinación de bloques de calibración área-amplitud y distancia amplitud. Las dimensiones de todos los bloques ASTM se encuentran en la norma ASTM E-127, que también presenta los pasos recomendados para la fabricación y el control de aleación de aluminio en bloques de referencia estándar. Los pasos recomendados para el control y la fabricación de bloques de referencia estándar de acero se encuentran en la Norma ASTM E-428.

- **Bloques I.I.W: bloque V1, V2 y bloque de calibración de resolución.**

Son utilizados para calibrar distancia y sensibilidad, en ellos es chequeado el funcionamiento de palpadores normales y angulares y la operatividad del equipo de ultrasonido, están fabricados en acero bajo en carbono y con tratamiento térmico de normalizado.

Bloque IIW V1: Cuenta con un círculo ubicado en el orificio con diámetro 50mm, y se caracteriza por las entallas laterales que se corresponden con el centro del sector de $R=100\text{mm}$, con el que se obtienen sucesiones de ecos de la superficie circular.

Figura 35. Bloque IIW V1



Fuente: INSPEQ INGENIERÍA LTDA. Calibración de sistemas ultrasónicos,

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

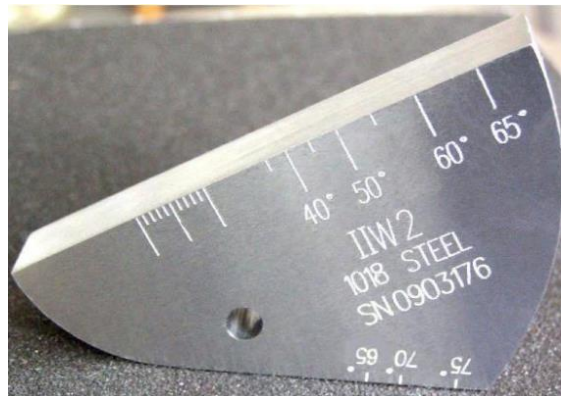
- Calibración de la base de tiempos con palpador normal.
- Calibración de la base de tiempos con palpador angular.

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

Bloque IIW V2.

Permite comprobar el ángulo real del haz ultrasónico, de la misma manera que se hace con el bloque V1, que utiliza las reflexiones del haz en el orificio de 5mm taladrado en el bloque. Este bloque no tiene entalla en el centro de los dos sectores de radios 25 y 50 mm, lo cual permite que independientemente de la superficie a la que se envíe el haz, también se obtendrá el eco de reflexión de la otra.

Figura 36. Bloque IIW V2



Fuente: REPRESENTACIONES INDUSTRIAL CYM. bloque IIW V2. Disponible en: http://www.representacionesindustrialescym.com/ndt_ultrasonidos_accesorios.php

Bloque escalonado.

Diseñado en forma de escalerilla, permite la calibración de palpadores normales, más que todo para palpadores emisor-receptor para la medición de espesores. Se encuentran en diferentes medidas y por igual en el sistema métrico inglés o en el sistema métrico decimal.

Figura 37. Boque escalonado



Fuente: REPRESENTACIONES INDUSTRIAL CYM. bloque escalonado. Disponible en:
http://www.representacionesindustrialescym.com/ndt_ultrasonidos_accesorios.php

Un solo bloque de referencia no podrá ser adecuado para todos los procedimientos de examen, aunque algunos son adaptables a una variedad amplia de exámenes por la naturaleza general de su diseño.

El tipo de estándar varía con el tipo de objeto que será examinado (forja, placa, soldadura, tubería, etc.), con el objetivo del examen y con el tipo de onda (longitudinal, de corte o superficial)

4.5 PROCESO DE SOLDADURA

Se denomina así a todos los procesos de unión de metales que se realizan por fusión localizada de las partes a unir, mediante la aplicación conveniente de calor o presión. Puede ser con y sin aporte de material a las piezas unidas donde el material de aporte es de igual o diferente tipo a las partes a unir. Es importante tener en

cuenta que la soldadura cambia la estructura física de los materiales que se sueldan, debido a que cambia alguna de las propiedades de los materiales que se están uniendo⁵.

Se clasifican de la siguiente manera:

- **Soldadura Fuerte:** Es una operación en la cual dos o más partes son unidas mediante calor o presión o ambos efectos a la vez, obteniéndose continuidad de la naturaleza del material entre las partes unidas. Este tipo de soldadura se puede realizar con o sin material de aporte, la cual a su vez podemos encontrar:
 - **Soldadura por arco:** También denominado soldadura eléctrica por arco, en este proceso se aprovecha el calor desarrollado por el arco eléctrico que se libera entre un electrodo (metal de aportante) y el material por soldar, fundiendo el material aportante y posteriormente permitiendo la unión, La alimentación del arco de soldadura se obtiene normalmente con una máquina generadora de corriente alterna (equipo de soldadora), en los procesos por arco eléctrico se incluyen el SMAW, GMAW, MIG y TIG.
 - **Soldadura por resistencia:** También denominada soldadura por puntos, consiste en la fusión de elementos mediante la combinación de calor-presión y por el calentamiento que experimentan los metales debido a su resistencia al flujo de una corriente eléctrica, el calor se genera mediante una resistencia eléctrica dirigida hacia el flujo de corriente en la unión que se va a soldar, este proceso no tiene necesidad de utilizar gases protectores, fundentes o metales aportante

⁵ Escuela Colombiana de Ingeniería. Soldadura protocolo. Curso de Procesos de Manufactura. P. 9.

- **Soldadura débil :** En este tipo de soldadura podemos considerar el Soldering el cual consiste en calentar una junta a una temperatura apropiada y utilizar un material de aporte con punto de fusión por debajo de los 427 °C que distribuirá este material través de la junta; el otro proceso de soldadura débil es el Brazing el cual consiste en utilizar un material de aporte que se funde a una temperatura mayor a los 427°C pero por debajo del punto de fusión de los metales bases a ser soldados, el proceso por el cual es conducido el material de aporte es similar al usado en el Soldering.
- **Soldadura Autógena o por gas:** La soldadura con gas combustible tiene con principio la mezcla con uniformidad con el oxígeno, lo cual se genera cuando se combinan este tipo de mezcla produciendo una flama de alta temperatura. En este proceso se utilizan un gas acetileno, es un gas carburante cuya mezcla alcanza una temperatura aproximada de 3000 °C esta temperatura alcanza a fundir aproximadamente el 98% de los materiales. La alta temperatura producida por la combustión del acetileno con el oxígeno dirigido por un soplete funde la superficie del metal de aporte, para rellenar las separaciones o ranuras a medida que la flama se desplaza a lo largo de la unión.

4.5.1 Determinación de los defectos en el proceso de soldadura. Al realizar inspecciones al proceso de soldadura mediante ensayos no destructivos hay que tener claro tres términos fundamentales al momento de interpretar las señales que emiten los equipos, como lo son indicación, discontinuidad y defecto, que a partir del criterio y experiencia del inspector determinaría si es aceptable según los requerimientos o normas a los que esté sometido la pieza o elemento a inspeccionar.

Indicación. Es toda respuesta que se obtiene cuando se aplica un método de inspección por ensayos no destructivos y que debe ser interpretado para conocer su significado.

Una indicación puede ser:

- Una indicación falsa es aquella que aparece durante la inspección y puede ser provocada por algún tipo de interferencia o una mala aplicación del método.
- Una indicación relevante o verdadera es aquella que por su ubicación, forma, tamaño o cantidad afecta la calidad de la pieza
- Una indicación no relevante puede ser producida por la estructura del material o por la configuración de la pieza, o puede ser ocasionada por algunas características del material o efectivamente puede ser aquella que por su ubicación, forma, tamaño o cantidad no presentan peligro para la integridad de la pieza

Discontinuidad. Es aquella indicación que se considere relevante, que representa una interrupción en la configuración física de la pieza y no afecte el rendimiento en el servicio de la misma. De tal manera las discontinuidades se clasifican en 3 partes:

- Inherentes: Aquellas que son generadas durante la producción inicial del estado de fusión.
- De proceso: Aquellas que se producen por procesos posteriores al estado de fundición, primarios como la forja o laminado o secundarios como maquinado, soldadura, tratamientos térmicos.
- De servicio: Aquellas que surgen durante el uso del producto final por condiciones de carga o ambientales.

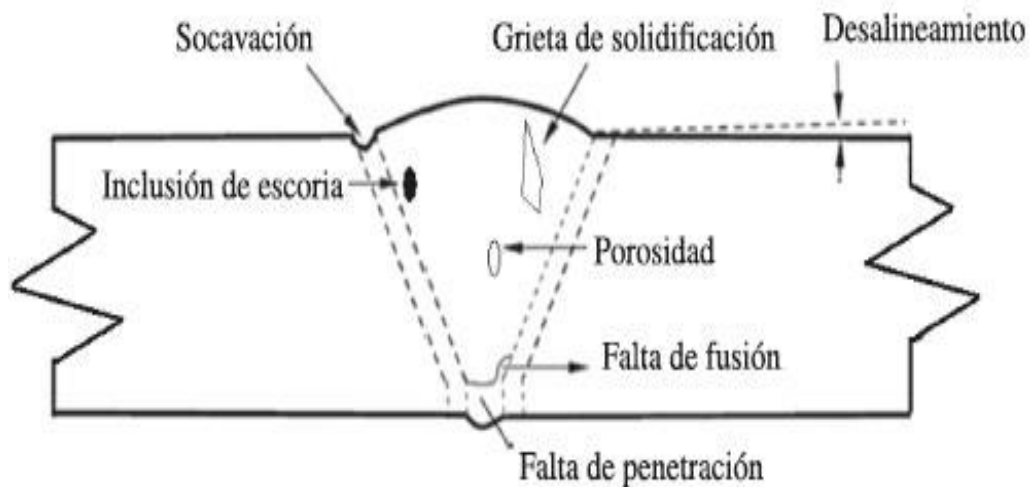
Defecto. Un defecto es una discontinuidad o grupo de discontinuidades cuyas indicaciones que, por su tamaño, forma o localización no cumplen con los criterios de aceptación especificados en las normas, pero hay que tener en cuenta las

siguientes argumentaciones ya que en los ensayos no destructivos son primordiales al cual tiene y que tener encueta a la hora de una aceptación.

- No todas las indicaciones son discontinuidades.
- No todas las discontinuidades son defectos.
- No todas las discontinuidades producen indicaciones.

Al profundizar en las discontinuidades que se puedan presentar en una soldadura se observa que las mayorías son de tipo interno, en las cuales se centrara este estudio debido que las discontinuidades externas podrían generar confusión en la interpretación de los datos, según la posición donde se presente la discontinuidad y el tipo de eco se definirá el tipo de discontinuidad y se determinara si es un defecto o no.

Figura 38. Discontinuidades comunes en cordón de soldadura

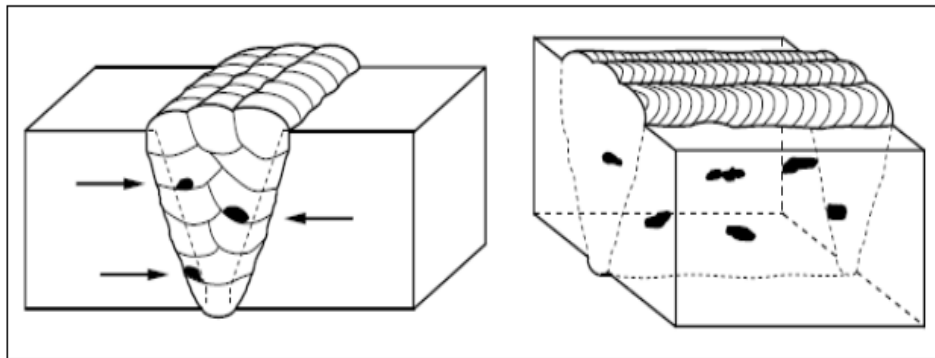


Fuente: INGENIARE.vol.21 no.2 Arica Agosto. 2013. Disponible en <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052013000200011>

Dentro de las discontinuidades internas más comunes se tiene:

Inclusión de escoria. Son inclusiones los residuos originados por materiales sólidos extraños atrapados en la masa del metal durante el proceso de soldadura. Tal como se muestra en la figura 39.

Figura 39. Inclusión de Escoria.



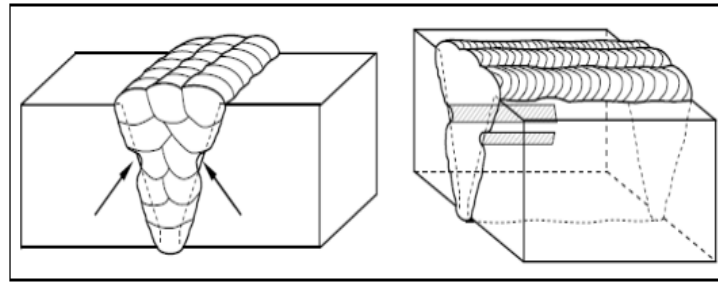
Fuente: ROMERO REYES, Bernardo Jesus, PROBOSTE CONTRERAS, Felipe Hernán. (2013). Inclusión de Escoria. [Figura]. Recuperado de http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/799/1/Romero_Reyes_Bernardo.pdf

Fusión incompleta. Falla entre el metal base y el metal de aportación, ocasionada por la falta de temperatura para fundir el metal sea base o cordón de soldadura ya sólido.

Según su localización estas pueden encontrarse:

- En la raíz, cuando su abertura no es suficiente, desalineamiento de las piezas, la temperatura no es lo bastante elevada etc.
- Entre cordones.
- Lateral.

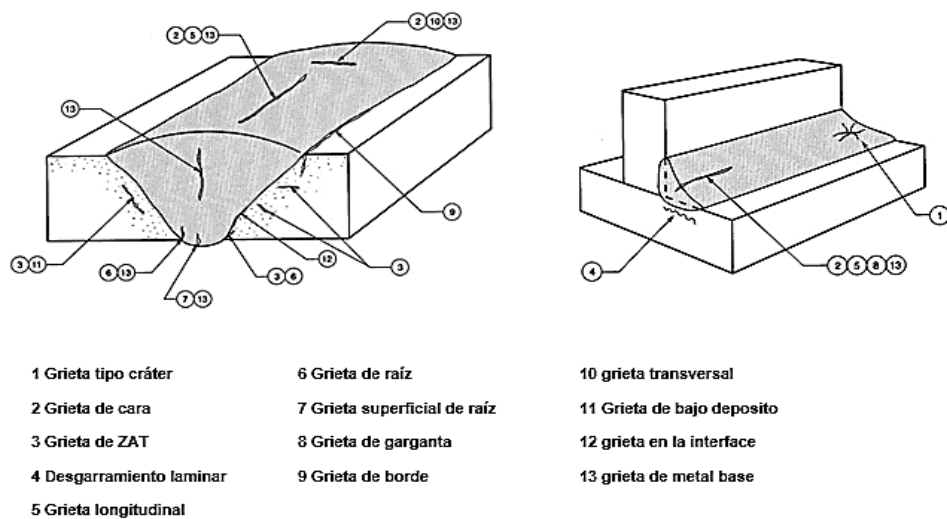
Figura 40. Fusión Incompleta.



Fuente: ROMERO REYES, Bernardo Jesus, PROBOSTE CONTRERAS, Felipe Hernán. (2013). Fusión incompleta. [Figura]. Recuperado de http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/799/1/Romero_Reyes_Bernardo.pdf

Grietas o fisuras. En la soldadura, esta es la discontinuidad más crítica; debido a su geometría alargada y sus extremos agudos, estas tienden a propagarse. Esta condición se acentúa con cambios de sección agudos que pueden secundar concentraciones de esfuerzos, por tal motivo en la mayoría de las normas independientes de su longitud las fisuras se consideran defectos. Las grietas pueden clasificarse en diferentes formas, dependiendo de su perspectiva:

Figura 41. Tipos de grietas en soldadura



Fuente: NDTELEARNING. Disponible en <http://www.ndtelearning.com/defectologia.html>

Clasificación básica de las grietas según su propagación:

- Grietas en caliente: Se desarrollan durante la solidificación y su propagación es intergranular (entre granos).
- Grietas en frío: Se desarrollan luego de la solidificación, son asociadas comúnmente con fragilización por hidrógeno. Se propagan entre y a través de los granos (inter y transgranular).

Según su forma, las fisuras también se pueden clasificar en:

Tabla 2. Clasificación de grietas.

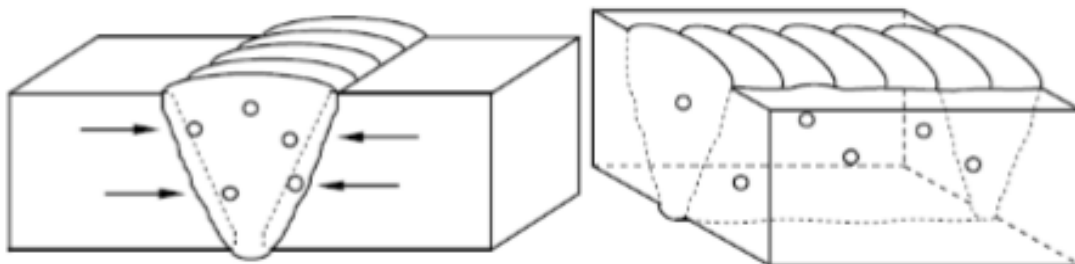
Tipo de grietas	Tipo según propagación	Origen	características
Grietas longitudinales	Grietas en frío	Resultan de esfuerzos transversales de contracción o esfuerzos asociados a condiciones de servicio	Grietas paralelas al eje de la soldadura
Grietas de garganta	Grietas en caliente	Como continuación de grietas internas, se extienden a lo largo de la garganta de la soldadura	También son grietas longitudinales
Grietas de borde	Grietas en frío	Se propagan desde los bordes de la soldadura, estas grietas son generalmente el resultado de contracciones térmicas actuando en la zona afectada térmicamente	Grietas perpendiculares a la superficie del metal base
Grietas de cordón	Grietas en frío	Resultan por la presencia de hidrogeno en la zona de la soldadura; presente en el metal base, de aporte, en la atmosfera o contaminación superficial	Grietas longitudinales paralelas al eje del cordón
Grietas de raíz	Grietas en caliente- Grietas en frío	Debido a juntas inadecuadas, como aberturas de raíz; estas provocan concentraciones de esfuerzos	Son grietas longitudinales
Grietas de cráter	Grietas en caliente	Por un llenado incompleto del charco de soldadura fundida al terminar el arco; combinado a esfuerzos de concentración durante la	Por un llenado incompleto del charco de soldadura fundida al terminar el arco; combinado a

		solidificación dan origen a cráter o redes de grietas	esfuerzos de concentración durante la solidificación dan origen a cráter o redes de grietas
--	--	---	---

Fuente: ROMERO REYES, Bernardo Jesus, PROBOSTE CONTRERAS, Felipe Hernán. (2013). Clasificación de grietas. [Tabla]. Recuperado de http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/799/1/Romero_Reyes_Bernardo.pdf

Porosidades. Formada por gas atrapado durante la solidificación, la porosidad es una discontinuidad de tipo cavidad. Debido a su forma esférica, esta discontinuidad normalmente es considerada la menos peligrosa. Sin embargo, si la porosidad se ubica en un límite para contener gas o líquido, esta es considerada peligrosa. Los poros también pueden ser el inicio de una grieta, puede manifestarse de forma agrupada o uniforme en la soldadura como se aprecia en la figura 42.

Figura 42. Porosidad con discontinuidad uniforme.



Fuente: ROMERO REYES, Bernardo Jesus, PROBOSTE CONTRERAS, Felipe Hernán. (2013). Discontinuidad Uniforme. [Figura]. Recuperado de http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/799/1/Romero_Reyes_Bernardo.pdf

4.5.2 Normas enfocadas al proceso de soldadura. La inspección por ultrasonido está normalizada por diversas entidades a nivel internacional normas estandarización a nivel internacional de diversas entidades, cada una de estas define sus distintos protocolos para la inspección y evaluación de discontinuidades según los requerimientos del campo de aplicación que se desee estudiar; algunos de los códigos más utilizados son:

- ANSI / ASME Boiler and Pressure Vessel Code (Código para Recipientes a Presión y Calderas de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).
- ANSI / API 570 Piping Inspection Code (Código para Inspección de Tuberías del Instituto Americano del Petróleo)
- ANSI/ AWS D1.1 Structural Welding Code (Código de Soldaduras Estructurales de la Sociedad Americana de Soldadura).

Los criterios de aceptación y rechazo están a continuación:

El Código ASME para Recipientes a Presión y Calderas, Sección VIII, División 1, Apéndice 12, Inspección Ultrasónica de Soldaduras (UT).

El Estándar API 1104 para Soldadura de Tubería e Instalaciones Relacionadas, Sección 9 –Estándares de Aceptación para Pruebas no Destructivas, Parte 9.6, Inspección Ultrasónica.

El Código AWS para Estructuras Soldadas de Acero, ANSI / AWS D1.1, Cláusula 6–Inspección, Parte C –Criterios de Aceptación, 6.13 Inspección por Ultrasonido.

De lo anterior descrito se tuvo en cuenta en este proyecto el código AWS D1.1 el cual contempla parámetros que van desde estándares para la inspección hasta la calificación de los inspectores, el equipo a emplear en el estudio cumple con los requisitos que se establecen en la norma, en esta sección nos enfocamos en la clasificación de las indicaciones y en los criterios de aceptación o rechazo respecto a estructuras cargadas estáticamente mencionadas en la norma, La aceptación o rechazo de las discontinuidades está dada según su clasificación en la siguiente tabla:

Tabla 3. Clasificación de discontinuidades

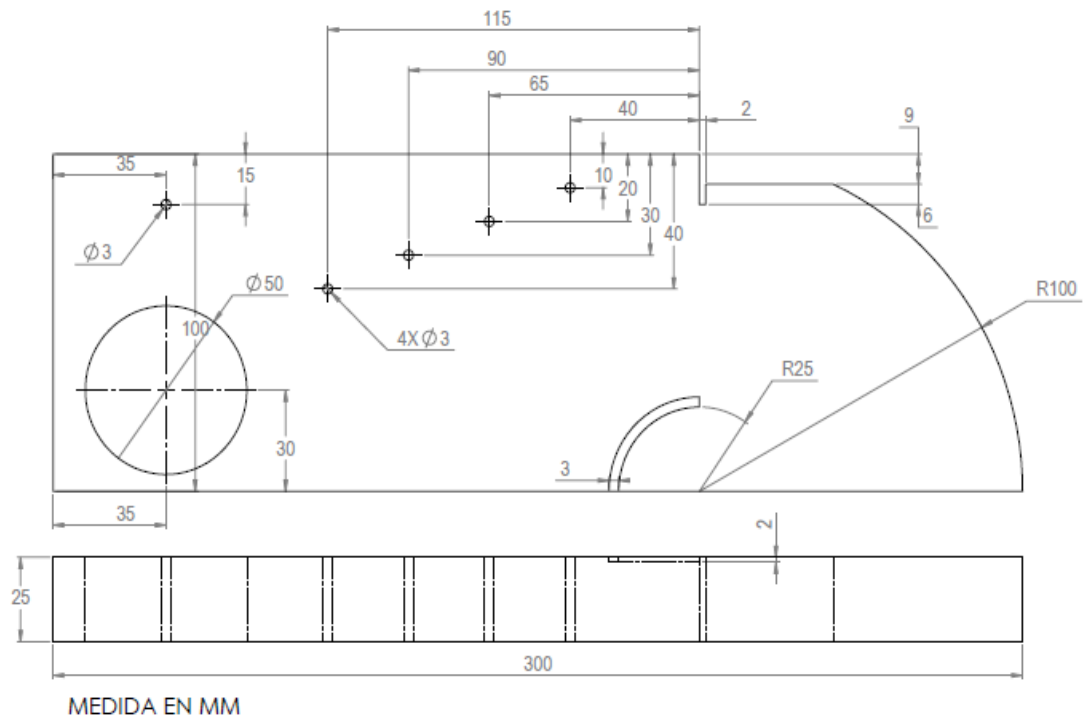
CLASE A	(discontinuidades grandes) Se rechaza sin importar su longitud
CLASE B	(discontinuidades medias) Se rechaza si su longitud es mayor a 20mm
CLASE C	(discontinuidades pequeñas) Se rechaza si su longitud es mayor a 50mm
CLASE D	(discontinuidades menores) Se acepta sin importar su longitud.

Fuente: AWS D1.1

5. METODOLOGIA PARA INSPECCION DE PLACAS PLANAS

A continuación se presentara la metodología necesaria para la inspección de placas planas tanto para soldaduras como en espesores utilizando el equipo de ultrasonido OmniScan mx2, la cual consta de una configuración inicial de las leyes focales de acuerdo a la aplicación y a la pieza-soldadura, así como la correcta calibración del equipo tanto en parámetros ultrasónicos (sensibilidad, velocidad y retardo de zapata) como en parámetros de dimensionamiento(curva TCG), para ello se empleara el bloque de calibración IIW V1 modificado como se muestra su plano en la figura 44. Por último, se realizará los ajustes requeridos de los parámetros generales para una inspección de soldadura y de espesores utilizando el encoder de posición VersaMOUSE para una adquisición de datos.

Figura 43. Bloque de calibración IIW V1 modificado



5.1 CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO.

La configuración del equipo para la inspección de soldaduras y espesores en placas planas consiste en primera instancia en la determinación de los parámetros de la pieza-soldadura tales como espesor, material, tipo de muestra y soldadura, dicha configuración debe ser la adecuada para el tipo de muestra a inspeccionar, introducidos estos valores se procede comenzar la configuración de la inspección para ello La configuración del equipo consiste en:

- **Configuración de la aplicación:** la cual consta de los siguientes dos parámetros el modo de grupo el cual se selecciona Phased Array y la aplicación en si (soldadura, y otros para espesores).
- **Configuración de palpador y zapata:** consiste en la selección adecuada del palpador y de la zapata con la cual se realizará la inspección. Para las inspecciones en soldadura se recomienda el uso de zapatas de tipo sectorial mientras que para las inspecciones de espesores se recomienda zapatas de tipo lineal.

Figura 44. Zapata sectorial (derecho) y zapata lineal (izquierdo)



El palpador puede ser el mismo para los diferentes tipos de aplicación, es importante la correcta selección del palpador y la zapata para obtener inspecciones fidedignas, sino se cuenta con una zapata y palpador

referenciado se debe introducir en el equipo los parámetros de construcción y geométricos.

- **Configuración de las leyes focales:** consiste en la selección del tipo de ley a utilizar si es una inspección en soldadura se debe utilizar una configuración sectorial o compuesta, si es una inspección de espesor se debe seleccionar una configuración lineal a cero grados, la selección determina el tipo de onda que emitirá el palpador para la ley sectorial ondas transversales y para la ley lineal ondas longitudinales.

La selección del número de elementos determina la apertura activa para cada haz de ultrasonido.

Para las leyes sectoriales se debe configurar el ángulo de haz el cual consiste en seleccionar el primer elemento para ajustar el elemento a la cual se realizará la primera apertura, así como el barrido sectorial determinado por el tipo de zapata seleccionado y por último el paso de ángulo el cual incidirá en la resolución de la inspección.

Para las leyes lineales a cero grados se debe configurar los elementos de la sonda tales como el primer elemento y el último elemento, así como el paso de elemento y el ángulo de incidencia el cual debe ser cero grados.

- **Generar leyes:** una vez configurada las leyes se procede a su posicionamiento solicitado de acuerdo a la aplicación para la inspección de soldadura se debe considerar un espaciamiento suficiente para evitar el contacto de la zapata con la soldadura mientras que para la inspección de espesor se recomienda dejar centrado.

Generadas las leyes focales se procede a la calibración de los parámetros de ultrasonido y dimensionamiento. Para información detalla consultar el anexo A.1 y A.2 para inspección de soldadura y B.1 para inspección de espesores referentes a la configuración inicial.

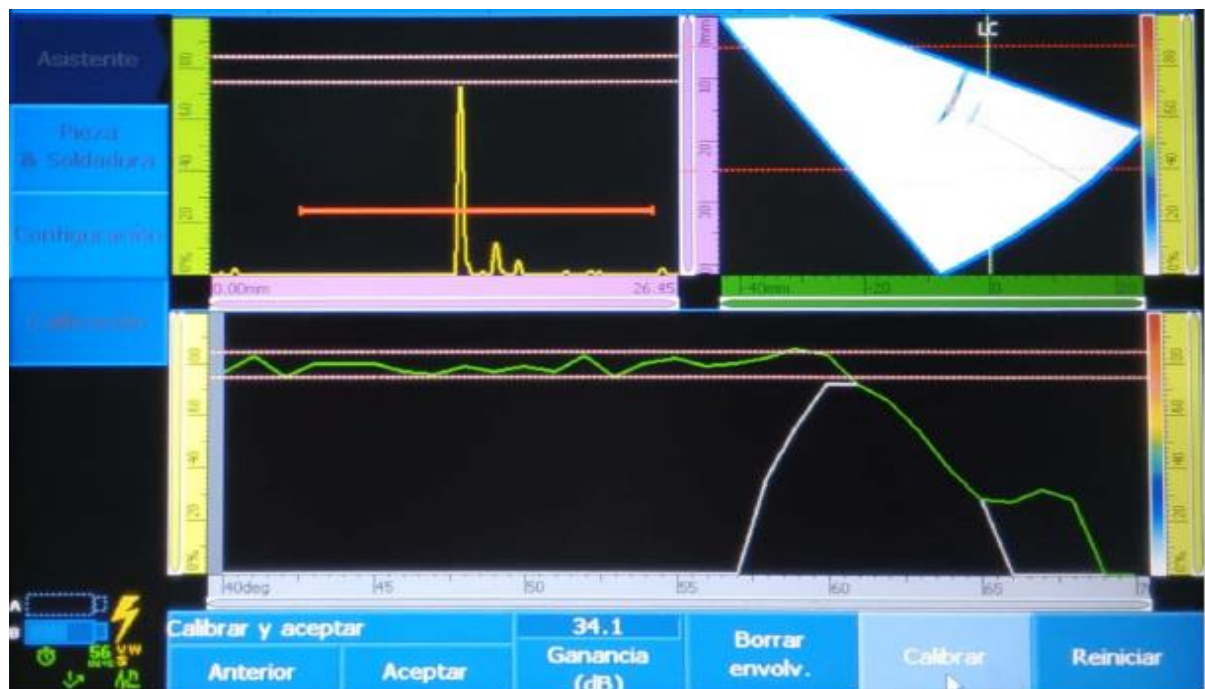
5.2 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

La calibración del equipo en soldadura y espesores consiste en la misma secuencia de pasos, a continuación, se mencionarán los aspectos de ultrasonido como dimensionamiento.

5.2.1 Parámetros de ultrasonido.

Sensibilidad: La calibración de sensibilidad normaliza la ganancia para todas las leyes focales; de esta manera, todas las leyes focales como se muestra en la figura 45 producen una señal de amplitud similar para el reflector de referencia conocido. La calibración de la sensibilidad se puede realizar con un solo reflector tal como radio, profundidad o espesor.

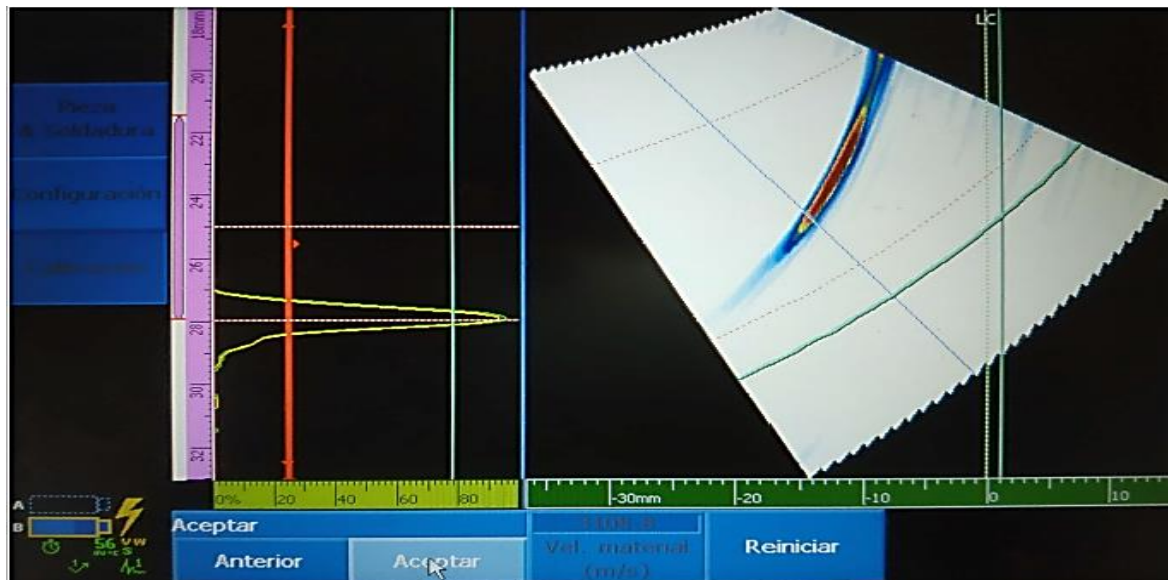
Figura 45. Calibración de Sensibilidad



Se recomienda realizar esta calibración primero para tener un valor de ganancia adecuado para las demás calibraciones el reflector utilizado suele ser un taladro entre 1,5 mm y 3 mm.

Velocidad: El objetivo de la calibración de la velocidad de propagación acústica es medir la velocidad real de las ondas de ultrasonido en el material bajo inspección. Es necesario calibrar en velocidad antes de proceder con la calibración del retardo de la zapata ya que el equipo usa la calibración de la velocidad para calibrar el retardo de la suela o zapata.

Figura 46. Calibración de Velocidad.

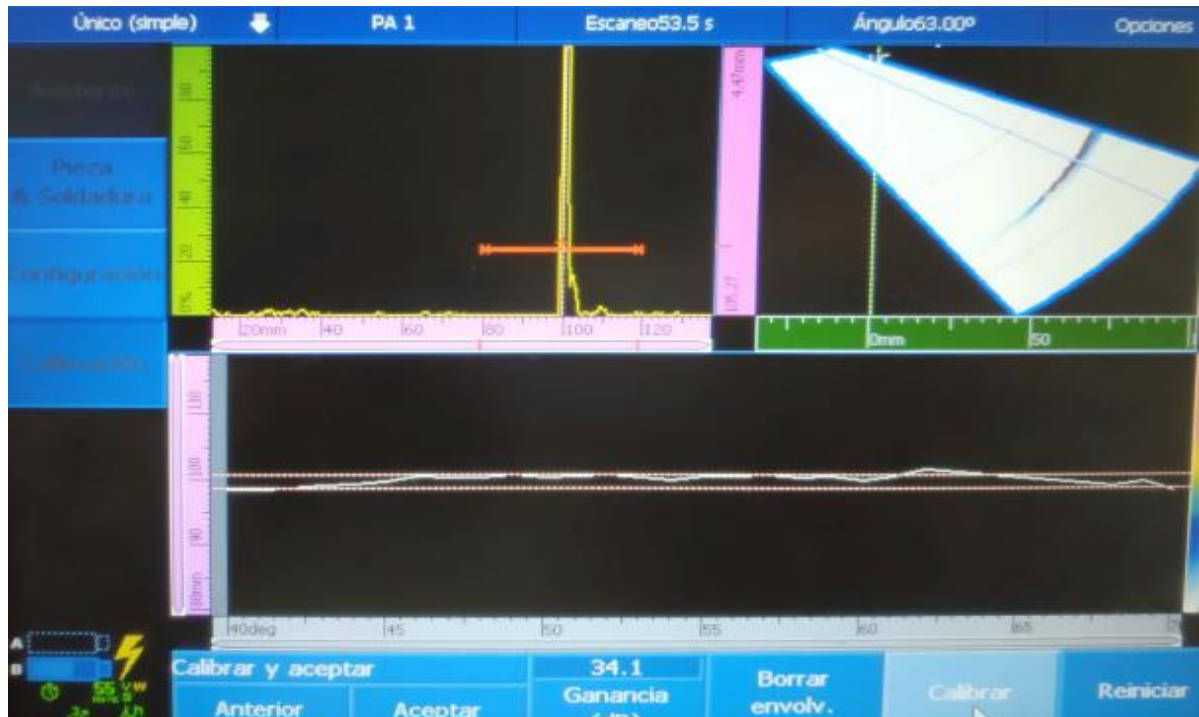


La calibración de la velocidad se puede realizar con dos diferentes reflectores tales como radios, profundidades o espesores, en la figura 46 se muestra la calibración final de la velocidad utilizando dos radios como reflectores.

Retardo de zapata: Esta calibración permite identificar el frente de la suela que está en contacto con la pieza bajo ensayo (bloque patrón V1). Lo cual establece una posición cero para la superficie de entrada de la pieza en todas las leyes focales o haces de ultrasonido. Es necesario la correcta calibración de este parámetro debido

a que normaliza para todas las leyes focales una discontinuidad a la misma profundidad. La calibración de la velocidad se puede realizar con un solo reflector tales como radio, profundidad o espesor. En la figura 47 se muestra el comportamiento descrito anteriormente.

Figura 47. Calibración de retardo de zapata



El equipo ofrece varias funciones de dimensionamiento (DAC, TCG, DGS y AWS). Estas permiten visualizar el tamaño real del reflector, independiente de su ubicación en profundidad en la pieza bajo ensayo.

5.2.2 Parámetro de dimensionamiento. Curva TCG: La calibración de la curva de ganancia corregida en función del tiempo (TCG). Permite visualizarla las discontinuidades con una amplitud similar del mismo tamaño a diferentes profundidades.

La calibración de la curva TCG para leyes sectoriales se realiza de manera similar a la calibración de sensibilidad como se muestra en la imagen 48, varia en la cantidad de reflectores que se toman, es decir realizar la calibración de diferentes reflectores a diferentes profundidades.

Figura 48. Calibración curva TCG.



Ahora bien, la curva TCG que se realiza en la calibración para inspección de espesor es manual, es decir se realiza directamente sobre la placa que se va a inspeccionar, normalizando a la misma amplitud de todos los ecos del espesor de la placa.

Una vez calibrado los parámetros de ultrasonido y dimensionamiento están listos para realizar determinada inspección, para los pasos detallados consultar el anexo A.3 para la inspección por soldadura y anexo B.2 para la inspección de espesores, el cual refiere el paso a paso para la calibración.

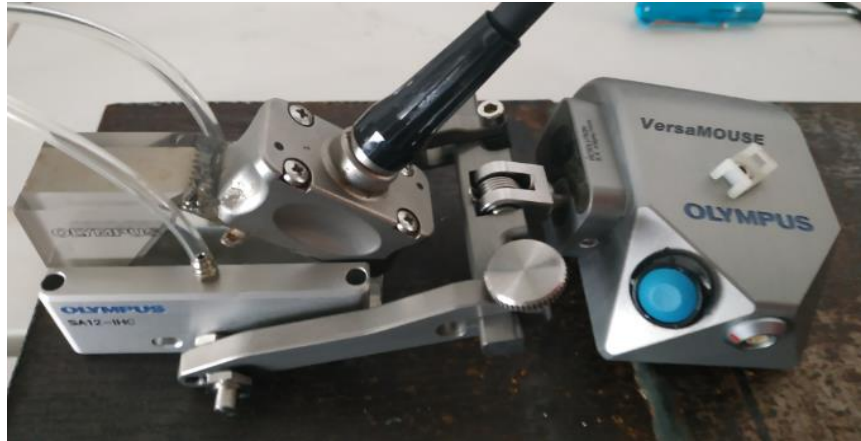
5.3 AJUSTES PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN PLACAS PLANAS

Para la adquisición de datos en el equipo OmniScan mx2 se usa un encoder de posición, para esta metodología se configurará el encoder VersaMOUSE el cual nos permite posicionar la sonda realizando inspecciones lineales en eje y bidimensional en tramo.

5.3.1 Configuración del VersaMOUSE. El VersaMOUSE es un encoder de posicionamiento el cual permite tanto escaneo de eje como escaneo de tramos, la configuración de dicho encoder consiste en: la polaridad que se dese utilizar, el tipo de codificador, la resolución propia del encoder y posición respecto al origen.

Para la adquisición de datos en una inspección de soldadura se debe seleccionar escaneo de eje determinando el área de inspección el cual es un eje normalizado por una distancia en el eje de escaneo, así como una resolución de escaneo a la cual se va a inspeccionar. El ensamble VersaMOUSE-zapata se muestra en la figura 49.

Figura 49. Ensamble VersaMOUSE-zapata sectorial.



Para la inspección de espesores se realiza un escaneo de tramo determinado por el área de la placa a inspeccionar y la distancia en el eje de indexación configurada en las leyes focales. El ensamble VersaMOUSE-zapata se muestra en la figura 50.

Figura 50. Ensamble VersaMOUSE-zapata lineal



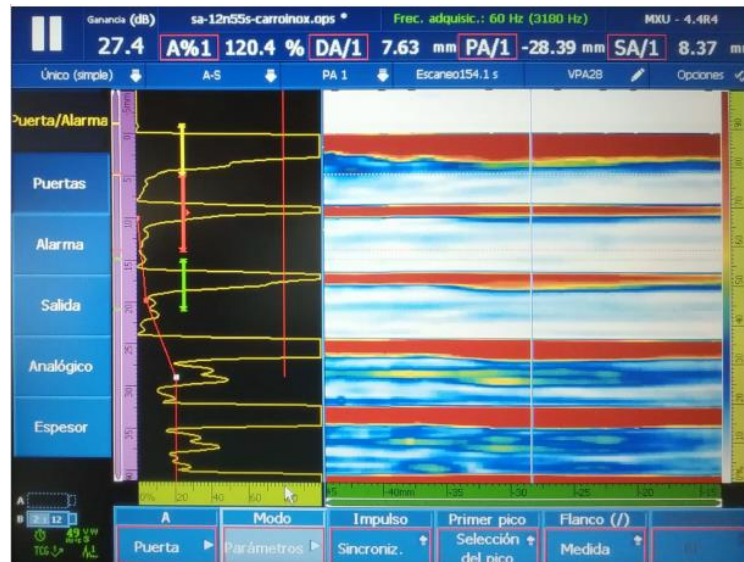
Los pasos detallados de la configuración del VersaMOUSE para la inspección de soldadura y de inspección de espesor se detallan en el anexo C.

5.3.2 Ajustes de las puerta A,I y B. El ajuste correcto en la inspección de soldadura consiste en posicionar la puerta A cortando todo el rango predeterminado por la configuración establecida en el equipo. Es importante que la puerta A sea posicionada uno a dos milímetros después para no tomar ecos generados por el ruido, los parámetros de la puerta A debe ser seleccionados como máximo pico en la selección de pico y flanco en la selección de medida.

Las zapatas para la inspección de espesores presentan una señal bastante grande de interferencia esta señal es provocada por la unión de la sonda y la zapata para cada zapata la señal es diferente, así como sus respectivos ecos como la configuración es lineal a 0° el equipo va a registrar la señal de las discontinuidades y esta generara ecos infinitamente.

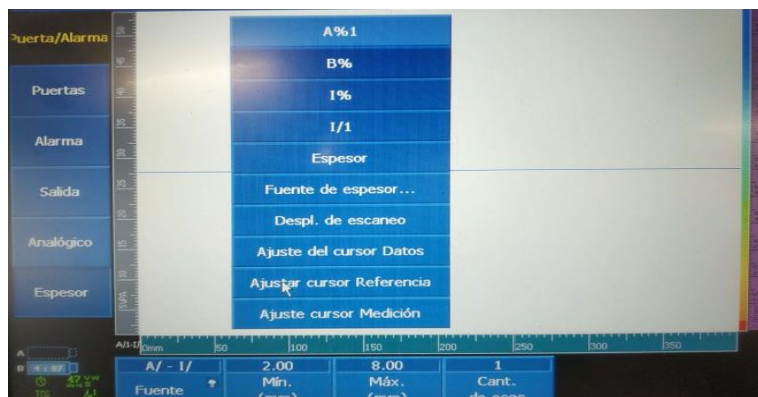
Los valores de la interferencia de la sonda y zapata no son deseados es por esta razón que se debe configurar correctamente las puertas A e I de forma que a partir de la configuración y la disposición de las puertas se pueda evitar tomar estos datos indeseados la manera correcta de hacerlo es posicionar la puerta I cortando por completo la señal de interferencia con el fin de que la puerta sirva de filtro para esta señal. La puerta A debe ser posicionada sobre la primera señal del espesor de la pieza a inspeccionar y la puerta B deber ser posicionada sobre el segundo backwall o el eco de la señal del espesor de la placa a inspeccionar. La configuración debe quedar como se muestra en la figura 51 para luego poder jugar con diferentes configuraciones de visualización de los datos en la inspección de espesores se recomienda una configuración A/-I/.

Figura 51. Menú de ajuste puertas A, I y B



la configuración recomendada para la puerta A, I y B se muestra en la figura 51 destacando la selección del pico como primer pico y la medida en flanco.

Figura 52. Configuración C-scan para escaneo



por último, se debe configurar el C-scan en espesor para esto se debe cambiar la inspección de amplitud por la de espesor. se oprime la pantalla dentro del C-scan y se selecciona la opción de espesor.

6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN LA DETECCIÓN DE FALLAS EN SOLDADURA Y ESPESORES EN ACERO SAE 1020 Y ACERO INOXIDABLE 304.

Para comprobar la metodología decidimos realizar la inspección de dos placas planas de diferente material acero SAE 1020 y acero inoxidable AISI 304 ambas placas cuentan con dos secciones diferentes para realizar la inspección en soldadura e inspección de espesor.

Placa SAE 1020. Las dimensiones de la placa son de 80x50 cm y 1 cm de espesor. La placa se divide en dos partes las cuales fueron unidas por el cordón de soldadura.

Figura 53. Dimensiones placa de acero SAE 1020



En la parte posterior de la placa se realizaron 9 taladros de diferentes diámetros que van desde los 3 mm hasta 10 mm. así como el logotipo de la UIS con una profundidad de 2 mm con el fin de ser localizados y medidos en la inspección de espesor. la posición de cada taladro se muestra en la figura 53.

Technical drawing of a 300x650 mm plate showing three rows of holes. The dimensions are in mm.

Top Row:

- Hole 1: $\varnothing 2,90 \nabla 2,00$
- Hole 2: $\varnothing 3,40 \nabla 2,00$
- Hole 3: $\varnothing 3,90 \nabla 2,00$
- Spacing between holes: 100,00 mm

Middle Row:

- Hole 1: $\varnothing 4,50 \nabla 4,00$
- Hole 2: $\varnothing 5,50 \nabla 4,00$
- Hole 3: $\varnothing 6,60 \nabla 4,00$
- Spacing between holes: 100,00 mm

Bottom Row:

- Hole 1: $\varnothing 7,60 \nabla 6,00$
- Hole 2: $\varnothing 8,40 \nabla 6,00$
- Hole 3: $\varnothing 10,50 \nabla 6,00$
- Gap from left edge: 50,00 mm
- Gap between holes: 50,00 mm

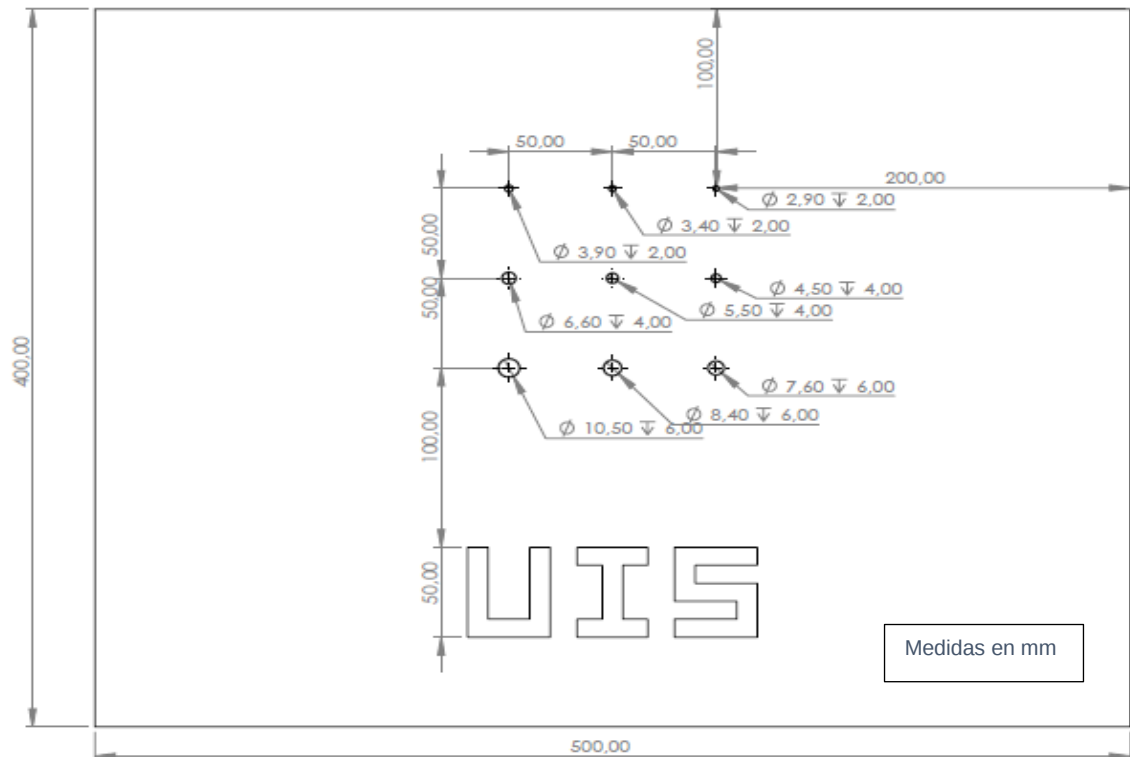
Medidas en mm

Figura 55. Dimensiones placa de Acero inoxidable AISI 304



En la parte posterior de la placa se realizaron 9 taladros de igual diámetro a los de la placa Acero SAE 1020. así como el logotipo de la UIS a una profundidad de 2mm. La posición de cada taladro se muestra en la figura 56.

Figura 56. Ubicación y dimensiones de imperfecciones inducidas en placa de acero inoxidable



Sección Soldadura. La soldadura seleccionada fue una soldadura tipo V desplazado en su bisel para ambas placas la cual es simétrica con una altura del talón de 3 mm y un desplazamiento de 1 mm con una zona del tamaño de altura 5 mm e inclinada 50°.

La configuración introducida en el equipo se muestra en figura 57.

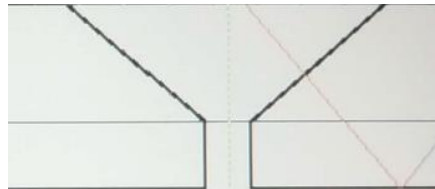
Figura 57. Características sección de soldadura

Selecciónar simetría de soldadu		Simétrica	
Anterior	Siguiente	Simetría	

Selecciónar el tamaño del talón		3.00	1.00
Anterior	Siguiente	Altura (mm)	Desplazamiento (mm)

Selecciónar el tamaño de la zona		5.00	50.00
Anterior	Siguiente	Altura (mm)	Ángulo (gr.º)

Figura 58. Vista transversal del cordón de soldadura a través del OmniScan mx2



Configuración inspección de espesor. Para la inspección de espesor en ambas placas se realizó una configuración lineal con 0° de inclinación, con los 64 elementos activos un paso de 1° focalizados a 15 mm sin desplazamiento en el eje de escaneo y en el eje índice. Los parámetros de la placa, así como la configuración final se muestran en las figuras 59 y 60 para la placa inoxidable AISI 304, SAE 1020 respectivamente.

Figura 59. Configuración final para inspección de espesor sobre placa de acero AISI 304

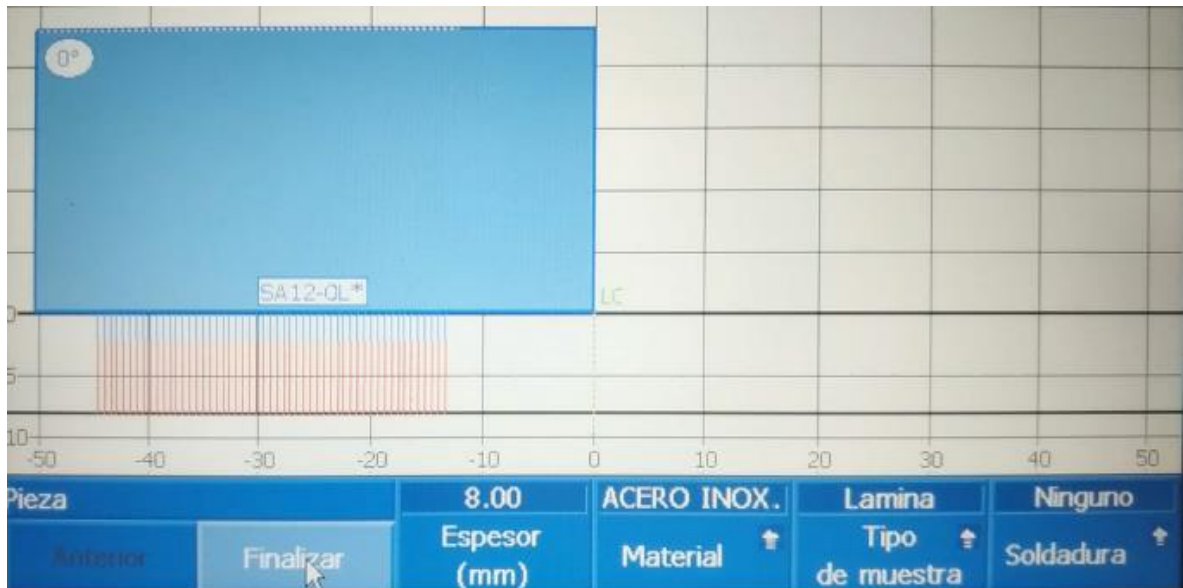
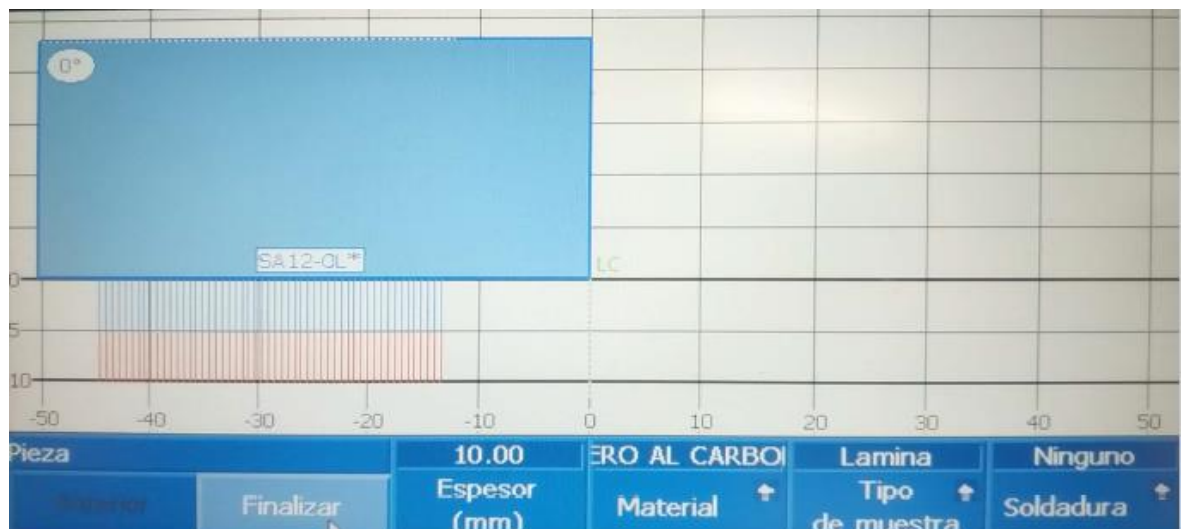


Figura 60. Configuración final para inspección de espesor placa de acero SAE 1020



Configuración inspección de Soldadura. Para la inspección de soldadura en ambas placas se realizó una configuración sectorial que va desde 40° hasta 70° con un paso de $0,5^\circ$ es decir un total de 62 ángulos o leyes focales cada ley focal con una apertura de 16 elementos activos focalizados a una distancia máxima de 15

mm y estos ángulos desplazados -10 mm en el eje de escaneo. Los parámetros de la soldadura, así como la configuración final se muestra en las figuras 61 y 62, para la placa de acero inoxidable AISI 304 y Acero SAE 1020 respectivamente.

Figura 61. Configuración final para inspección de soldadura sobre placa de acero AISI 304

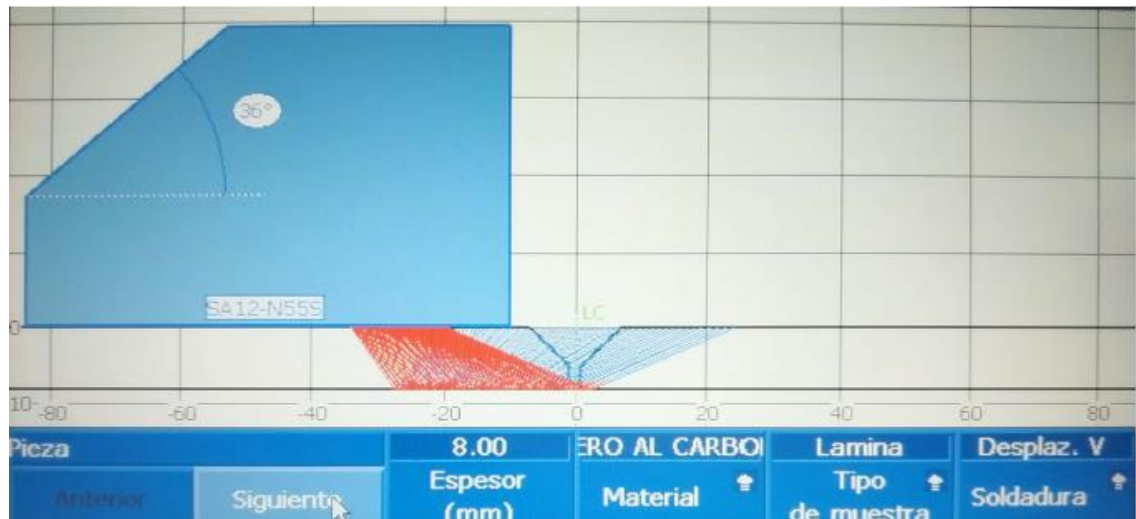


Figura 62. Configuración final para inspección de soldadura sobre placa de acero SAE 1020



Posterior a la configuración de las dimensiones de la pieza y los parámetros necesarios para realizar la inspección se debe activar la opción de dimensionamiento, tipo>>AWS y se configurara los parámetros para el tipo de

norma adecuada que nos permitirá categorizar las discontinuidades presentes en la soldadura, el requisito para poder utilizar esta opción es haber calibrado por sensibilidad para ángulos como 45°, 60° o 70°, como la calibración se hizo para con un barrido angular que va de 40° hasta 70° cumple con las condiciones.

7. RESULTADOS

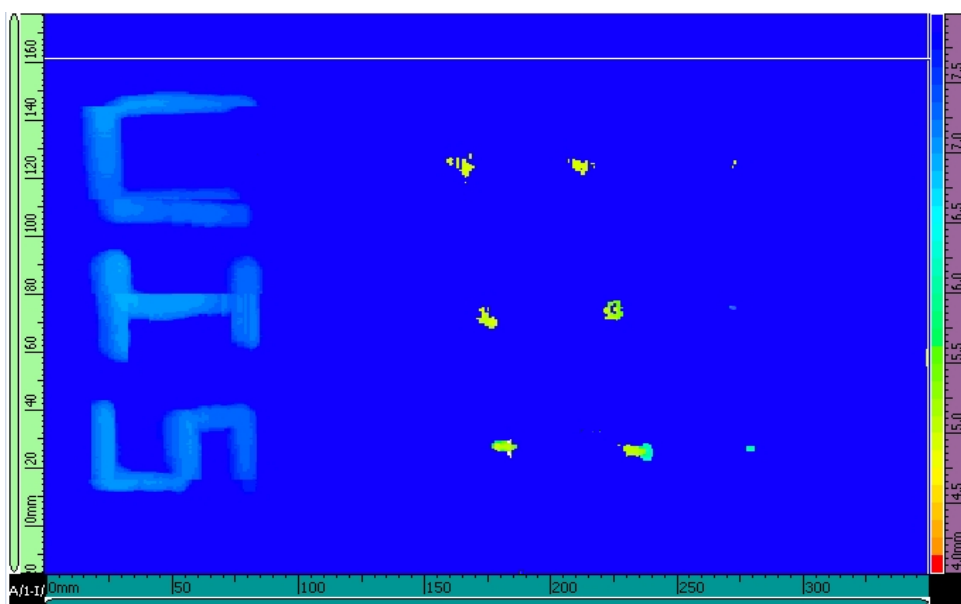
7.1 RESULTADOS INSPECCIÓN DE ESPESOR.

En la figura 63 y figura 64, podemos observar cómo se logró ubicar e identificar cada taladro en la placa, así como el logo UIS. mediante la escala de colores (escala derecha) podemos deducir fácilmente la profundidad a la que se encuentra cada objeto inducido. así como la posición y el tamaño aproximado de cada error es fácilmente deducidos gracias a las escalas en el eje de índice y el eje de escaneo.

Inspección espesor placa acero inoxidable AISI 304

El área tomada fue de 350 mm eje escaneo y aproximadamente 190 mm es decir 6 saltos sobre el eje índice con una resolución de 1 dato por mm. La resolución del enconder dos es determinada por la configuración de las leyes focales lo cual es de 31.8 mm.

Figura 63. Resultados de inspección espesor placa de acero AISI 304

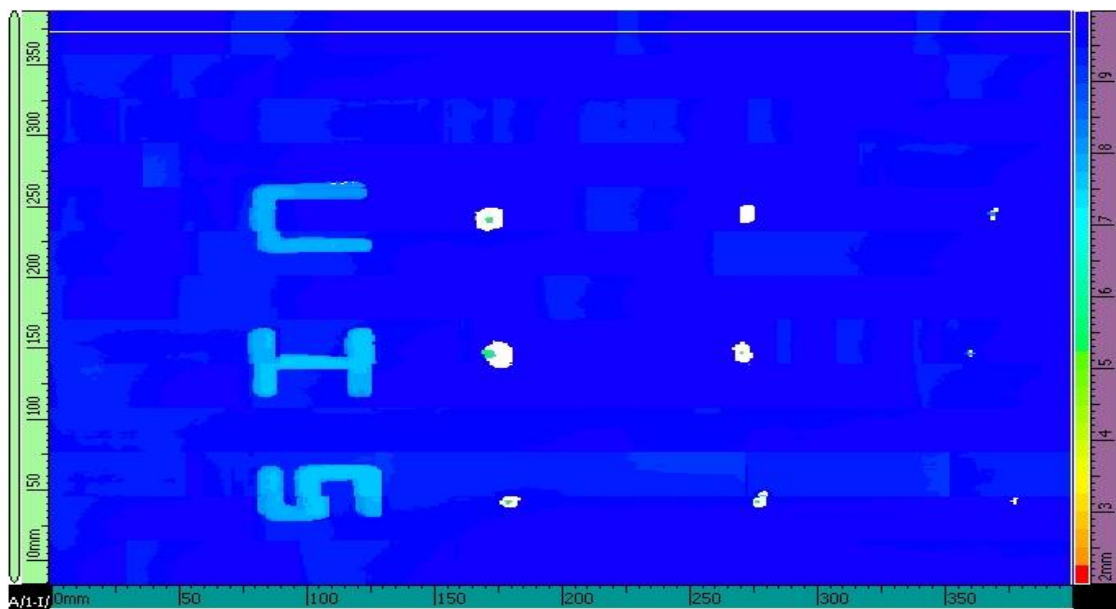


En la figura 63 se aprecia el logo de un color azul claro lo cual indica que se encuentra a una profundidad de 2 mm puesto que su espesor es 6 mm como lo indica la escala de colores. Los taladros de la primera fila son los de mayor tamaño y se encuentran a una profundidad aproximada de 4 mm puesto que su espesor registra 4.5 mm un color amarillo en la escala de colores. los taladros de la segunda fila se encuentran a una profundidad aproximada de 3 mm puesto que su escala de colores indica un color verde claro indicando un espesor de 5mm por último los taladros de menor diámetro se encuentran a una profundidad de 2 mm puesto que su espesor es de 6 mm su color es azul claro.

Inspección espesor placa acero SAE 1020

El área tomada fue de 400 mm en el eje de escaneo y aproximadamente 360 mm es decir 12 saltos sobre el eje índice con una resolución de 1 dato por mm. la misma resolución del encoder dos de la placa inoxidable 31.8 mm.

Figura 64. Resultados de inspección espesor placa de acero SAE 1020



En la figura 64 se aprecia el logo de la UIS donde encuentra a una profundidad de aproximadamente 2 mm es decir 8 mm en la escala de colores con un color azul

claro. los primeros taladros de mayor diámetro se encuentran aproximadamente 5 mm de profundidad estos taladros tienen un color blanco en la periferia debido a la falta de resolución del equipo, pero en el centro de los taladros se puede observar un color verde lo cual indica que tienen entre 4 y 5 mm de espesor. los taladros de la segunda fila presentan la misma indicación un color blanco en la periferia, pero un color verde claro lo cual nos indica que se encuentran a una profundidad aproximada de 4 mm es decir un espesor entre 5 y 6 mm en la escala de colores. Por último, los taladros de menor diámetro se encuentran a una profundidad aproximada de 2mm con color azul claro es decir un espesor de 8 mm en la escala de colores.

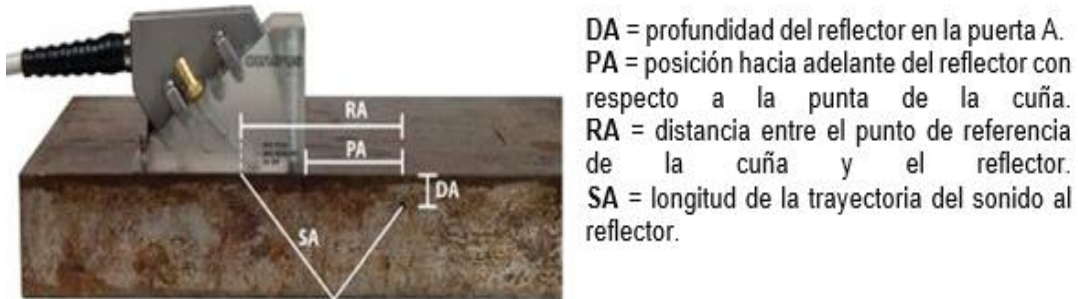
Se concluye con la configuración establecida se puede inspeccionar el espesor de placas planas ubicando defectos pequeños de hasta 3 mm de diámetro. pero la resolución del equipo se pierde a medida que se hace más grande el área a inspeccionar lo que conlleva a tomar más datos. La exactitud de la ubicación cada defecto depende mucho de la habilidad del operador del VersaMOUSE ya que depende de la sensibilidad del operador al pasar el carro perfectamente alineado por las líneas trazadas.

7.2 RESULTADOS INSPECCIÓN DE SOLDADURA.

Luego de realizar el barrido (eje previamente delimitado) a lo largo del eje de soldadura y realizada la inspección se procede a determinar ciertas características de los resultados obtenidos como lo son ubicación y categoría, en el capítulo 4 se expone como determinar la locación de una discontinuidad presente en un cordón de soldadura, el otro método es el que nos ofrece el equipo el cual se expone a través del display por el cual se observan algunos parámetros que nos permitirán determinar ciertas características sobre la localización de la imperfección.

Las siguientes dimensiones se pueden calcular a partir de la información de la probeta a inspeccionar:

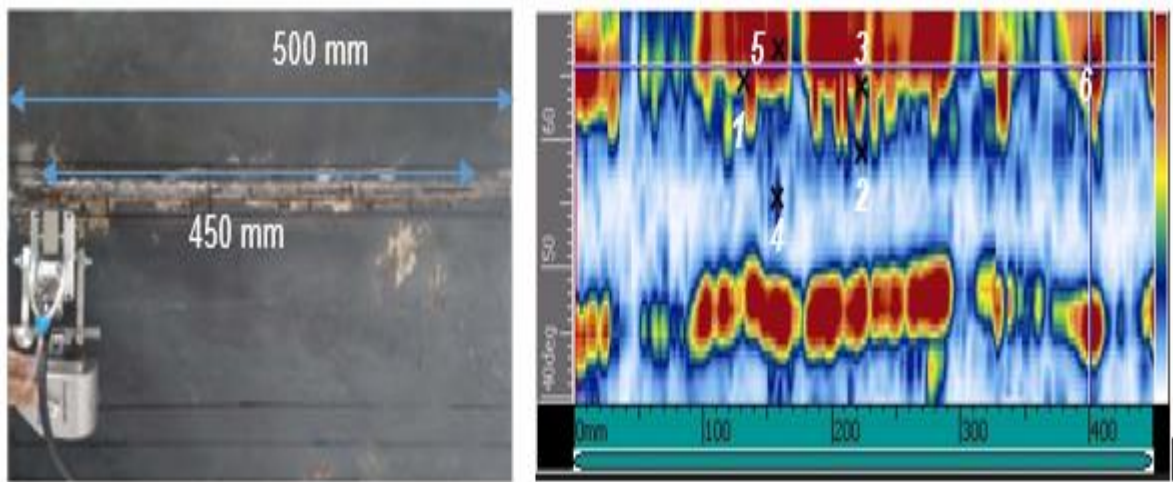
Figura 65. Parámetros para localización de imperfecciones.



Fuente: OLYMPUS. Ultrasonido Phased Array. Recuperado de [https://www.olympus-ims.com/es/omniscan-mx2/#!/cms\[tab\]=%2Fomniscan-mx2%2Foverview](https://www.olympus-ims.com/es/omniscan-mx2/#!/cms[tab]=%2Fomniscan-mx2%2Foverview)

Placa de acero SAE 1020. Se dispuso a posicionar el ensamble zapata-VersaMOUSE en la posición indicada en la figura 66 (izquierda) para realizar la adquisición de datos de las indicaciones en la soldadura aplicada en la placa. La inspección se realizó sobre el eje de escaneo con una distancia de 450 mm con la configuración de las leyes focales mostrada en el capítulo 6, se configuro el VersaMOUSE para inspección en eje con tipo de cuadratura centrado en el origen. La DATA total obtenida en la inspección se muestra en la figura 66 (derecha) lo cual nos muestra muchas discontinuidades a través del cordón de soldadura se determinó caracterizar 6 tipos de fallas.

Figura 66. Sección de placa de acero SAE 1020 inspeccionada (izquierda) y Ubicación de discontinuidades (derecha).



Las indicaciones obtenidas se representaron a través de las vistas Ray Tracing, el S-scan y el A-scan. también el equipo nos permitió sacar una tabla de informe con los parámetros más importante bajo norma AWS D1.1 para poder clasificar las discontinuidades elegidas a ser evaluadas.

Figura 67. Visualización discontinuidad N° 1 placa de acero SAE 1020

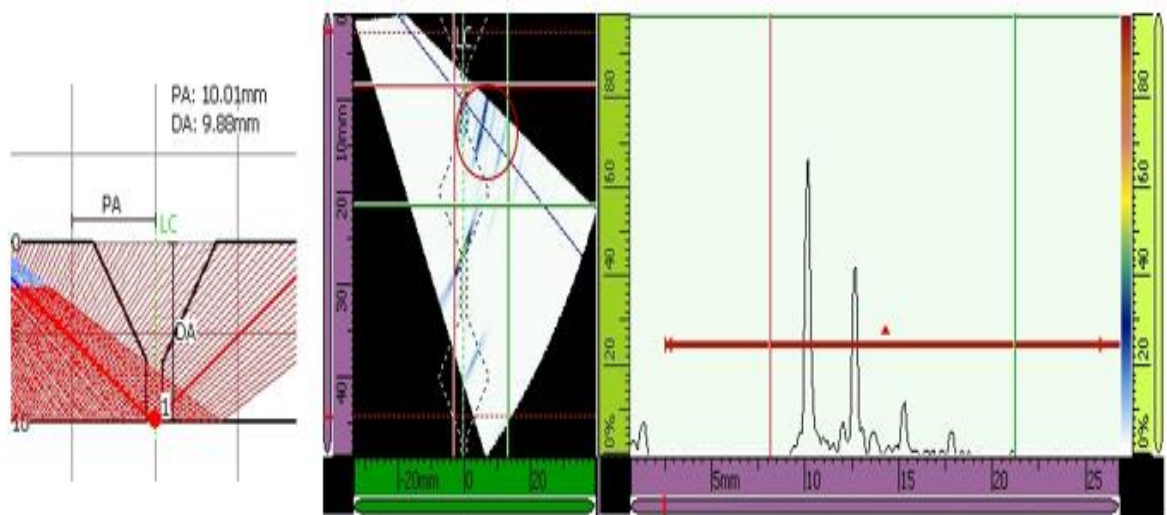


Tabla 4. Caracterización discontinuidad N.º 1 placa de acero SAE 1020

Indicación de defecto	Posición sobre el eje de soldadura	Índice	Canal I	A%	DA ^	PA ^	SA ^	AWS A	AWS C		AWS D		AWS CL
1	132.00 mm	- 10.00 mm	65.0 0°	67.5 %	9.8 8 mm	10.0 1 mm	23.9 5 mm	34.0 dB	0		1.5		A (70°)
Tipo de defecto: Falta de penetración								Según la norma toda indicación clasificada tipo A debe ser rechazada sin importar su longitud.					

Figura 68. Visualización discontinuidad N° 2 placa de acero SAE 1020

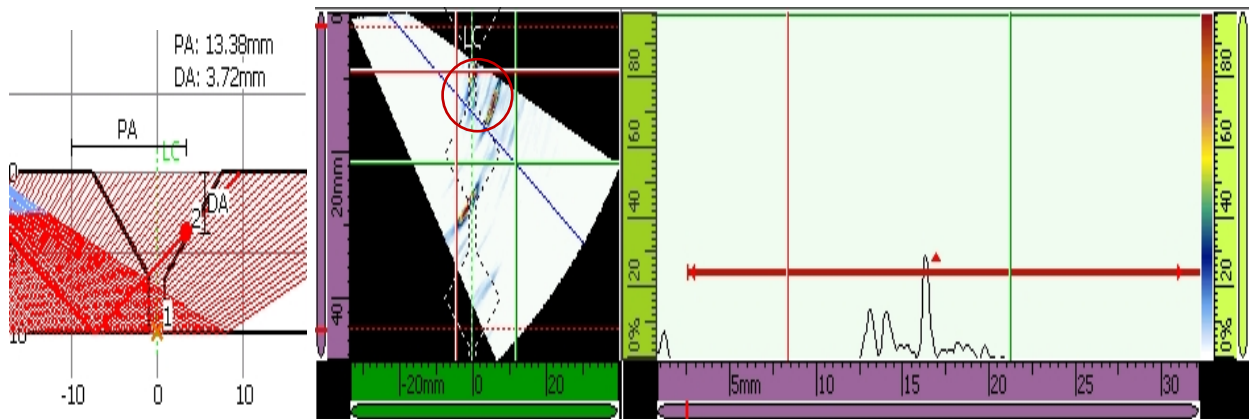


Tabla 5. Caracterización discontinuidad N° 2 placa de acero SAE 1020

Indicación de defecto	Posición sobre el eje de soldadura	Índice	Canal	A%	DA^	PA^	SA^	AWS A	AWS C	AWS D	AWS CL
2	223.00 mm	-10.00 mm	59.50 °	31.3 %	3.72 mm	13.38 mm	32.08 mm	40.7 dB	1	7.1	C (70°)
Tipo de defecto: Falta de fusión						Según la norma toda indicación clasificada tipo C puede ser aceptada si su longitud es menor a 20mm.					

Figura 69. Visualización discontinuidad N° 3 placa de acero SAE 1020

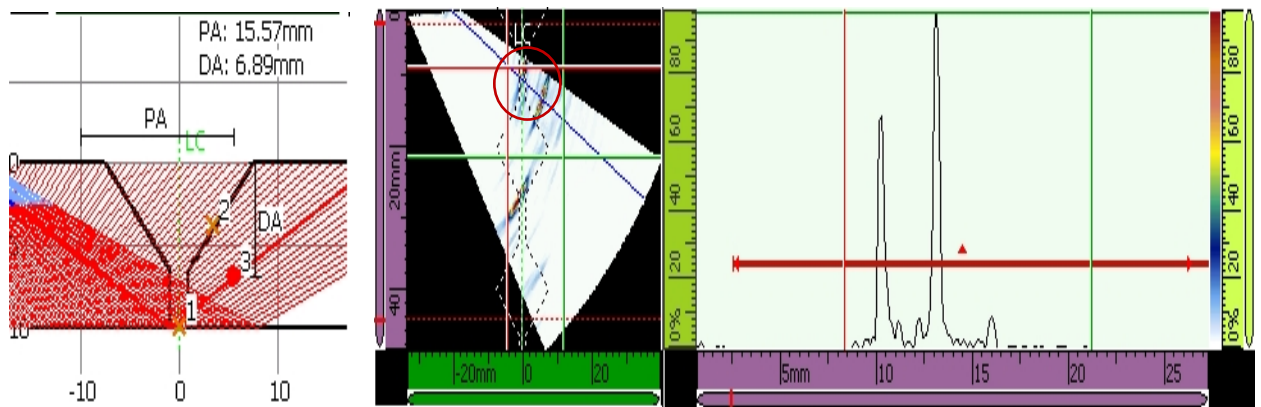


Tabla 6. Caracterización discontinuidad N° 3 placa de acero SAE 1020

Indicación de defecto	Posición sobre el eje de soldadura	Índice	Canal	A%	DA^	PA^	SA^	AWS A	AWS C	AWS D	AWS CL
3	223.00 mm	-10.00 mm	64.50 °	103.7 %	6.89 mm	15.57 mm	30.45 mm	30.3 dB	0	-2.3	A (70°)
Tipo de defecto: Grietas de solidificación								Según la norma toda indicación clasificada tipo A debe ser rechazada sin importar su longitud.			

Figura 70. Visualización discontinuidad N° 4 placa de acero SAE 1020

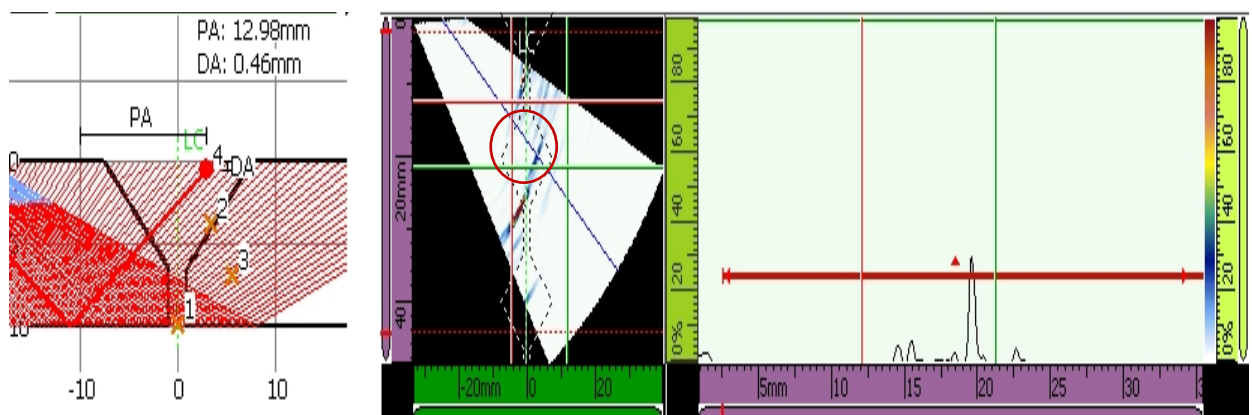


Tabla 7. Caracterización discontinuidad N° 4 placa de acero SAE 1020

Indicación de defecto	Posición sobre el eje de soldadura	Índice	Canal	A%	DA^	PA^	SA^	AWS A	AWS C	AWS D	AWS CL
4	158.00 mm	-10.00 mm	56.00 °	31.3 %	0.46 mm	12.98 mm	34.94 mm	40.7 dB	1	7.1	C (70°)
Tipo de defecto: Grieta tipo cráter						Según la norma toda indicación clasificada tipo C puede ser aceptada si su longitud es menor a 20mm.					

Figura 71. Visualización discontinuidad N° 5 placa de acero SAE 1020

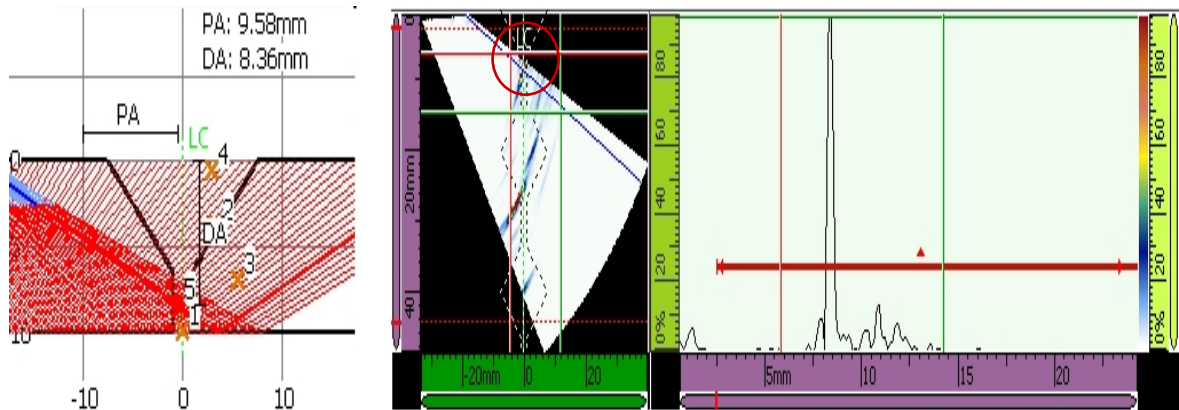


Tabla 8. Caracterización discontinuidad N° 5 placa de acero SAE 1020

Indicación de defecto	Posición sobre el eje de soldadura	Índice	Canal	A%	DA^	PA^	SA^	AWS A	AWS C	AWS D	AWS CL
5	159.00 mm	-10.00 mm	67.50 °	115.5 %	8.36 mm	9.58 mm	21.84 mm	29.3 dB	0	-3.2	A (70°)
Tipo de defecto: Falta de penetración						Según la norma toda indicación clasificada tipo A debe ser rechazada sin importar su longitud.					

Figura 72. Visualización discontinuidad N° 6 placa de acero SAE 1020

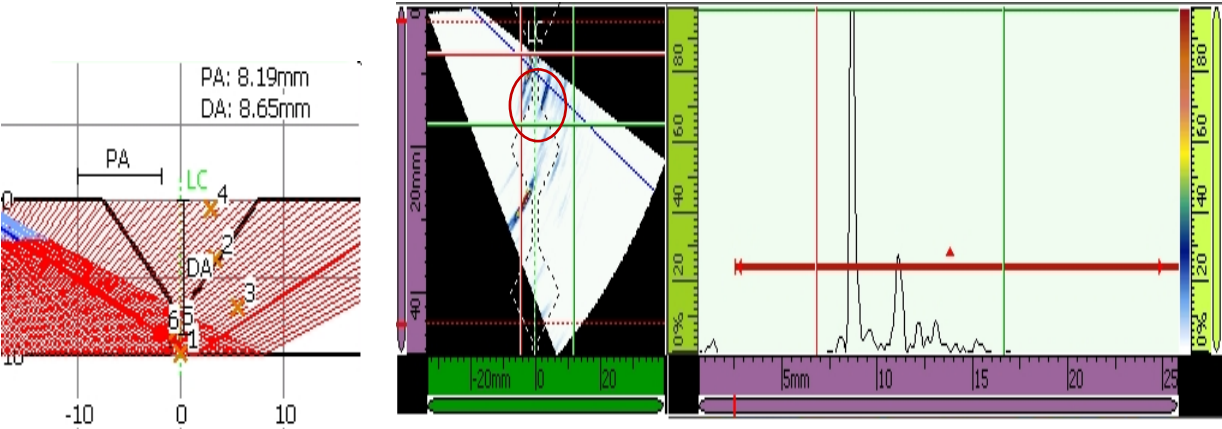
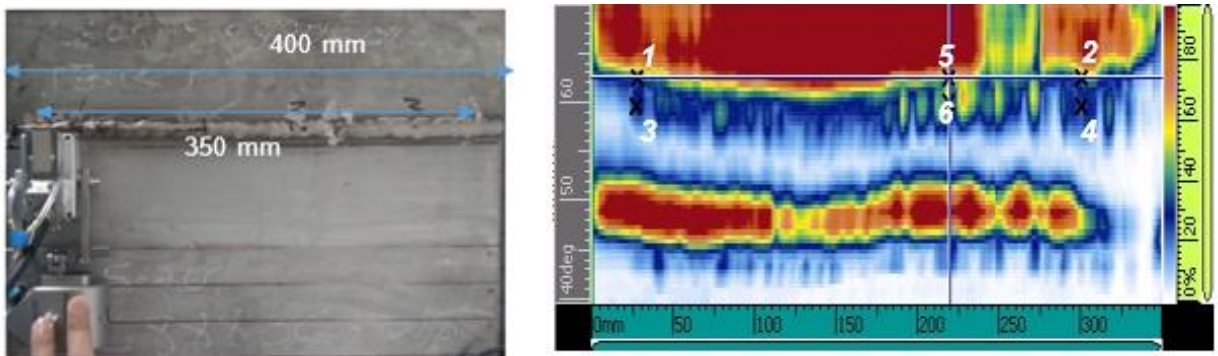


Tabla 9. Caracterización discontinuidad N° 6 placa de acero SAE 1020

Indicación de defecto	Posición sobre el eje de soldadura	Índice	Canal	A%	DA^	PA^	SA^	AWS A	AWS C	AWS D	AWS CL
6	401.00 mm	-10.00 mm	66.00 °	111.6 %	8.65 mm	8.19 mm	21.27 mm	29.6 dB	0	-2.9	A (70°)
Tipo de defecto: Grieta de solidificación						Según la norma toda indicación clasificada tipo A debe ser rechazada sin importar su longitud.					

Placa de acero inoxidable 304. Se dispuso a posicionar el ensamble zapata-VersaMOUSE en la posición indicada en la figura 73 (izquierda) para realizar la adquisición de datos de las indicaciones en la soldadura aplicada en la placa. La inspección se realizó sobre el eje de escaneo con una distancia de 350 mm con la configuración de las leyes focales mostrada en el capítulo 6, se configuro el VersaMOUSE para inspección en eje con tipo de cuadratura centrado en el origen. La DATA total obtenida en la inspección se muestra en la figura 73 (derecha) lo cual nos muestra muchas discontinuidades a través del cordón de soldadura se determinó caracterizar 6 tipos de fallas.

Figura 73. Sección de placa de acero inoxidable inspeccionada (izquierda) y Ubicación de discontinuidades (derecha)



Similar al proceso en la placa de acero SAE 1020 las indicaciones obtenidas se representaron a través de las vistas Ray Tracing, el S-scan y el A-scan. también el equipo nos permitió sacar una tabla de informe con los parámetros más importante bajo norma AWS D1.1 para poder clasificar las discontinuidades elegidas a ser evaluadas.

Figura 74. Visualización discontinuidad N° 1 placa de acero AISI 304

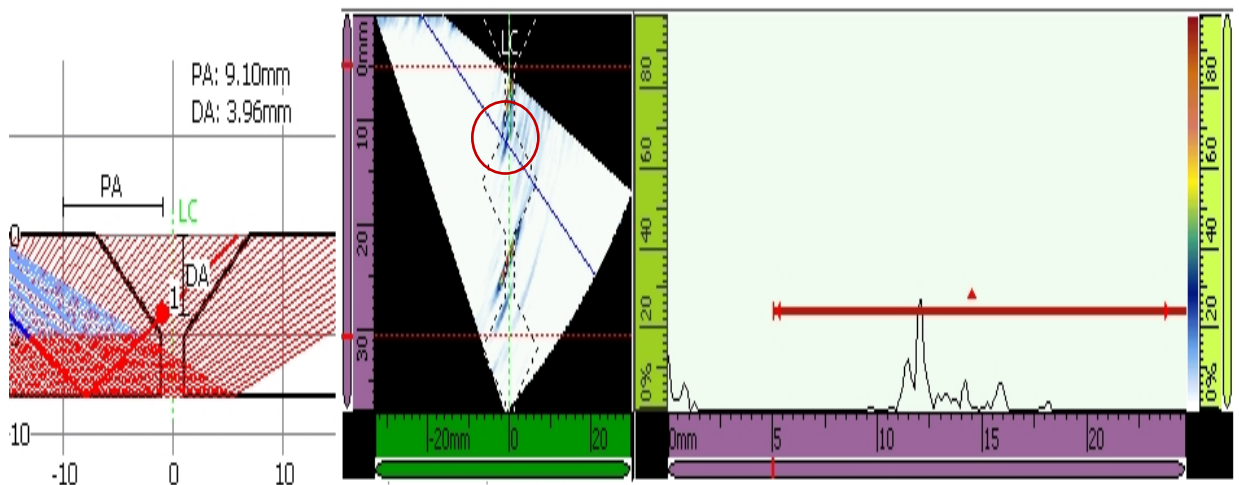


Tabla 10. Caracterización discontinuidad N° 1 placa de acero AISI 304

Indicación de defecto	Posición sobre el eje de soldadura	Índice	Canal	A%	DA [^]	PA [^]	SA [^]	AWS A	AWS C	AWS D	AWS CL
1	27.00 mm	-10.00 mm	60.00 °	29.4	3.96 mm	9.10 mm	24.08 mm	40.0	0	8.7 db	D (70°)
Tipo de defecto: Porosidad						Según la norma toda indicación clasificada tipo C puede ser aceptada si su longitud es menor a 50 mm.					

Figura 75. Visualización discontinuidad N° 2 placa de acero AISI 304

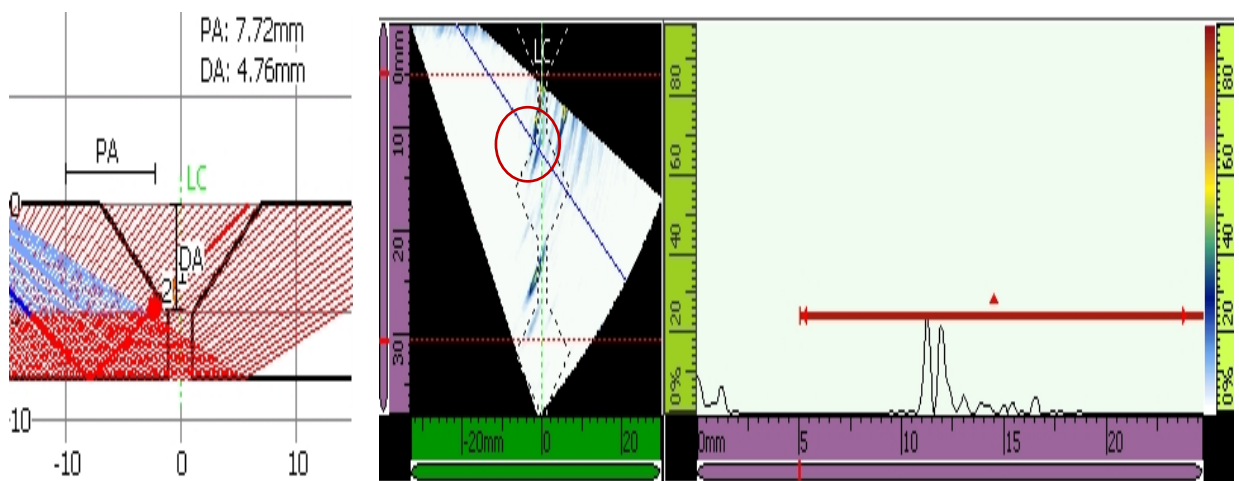


Tabla 11. Caracterización discontinuidad N° 2 placa de acero AISI 304

Indicación de defecto	Posición sobre el eje de soldadura	Índice	Canal	A%	DA [^]	PA [^]	SA [^]	AWS A	AWS C	AWS D	AWS CL
2	301.00 mm	-10.00 mm	60.00 °	26.4	4.76 mm	7.72 mm	22.48 mm	40.9	0	9.6 db	D (70°)
Tipo de defecto: Falta de fusión						Según la norma toda indicación clasificada tipo C puede ser aceptada si su longitud es menor a 20mm.					

Figura 76. Visualización discontinuidad N° 3 placa de acero AISI 304

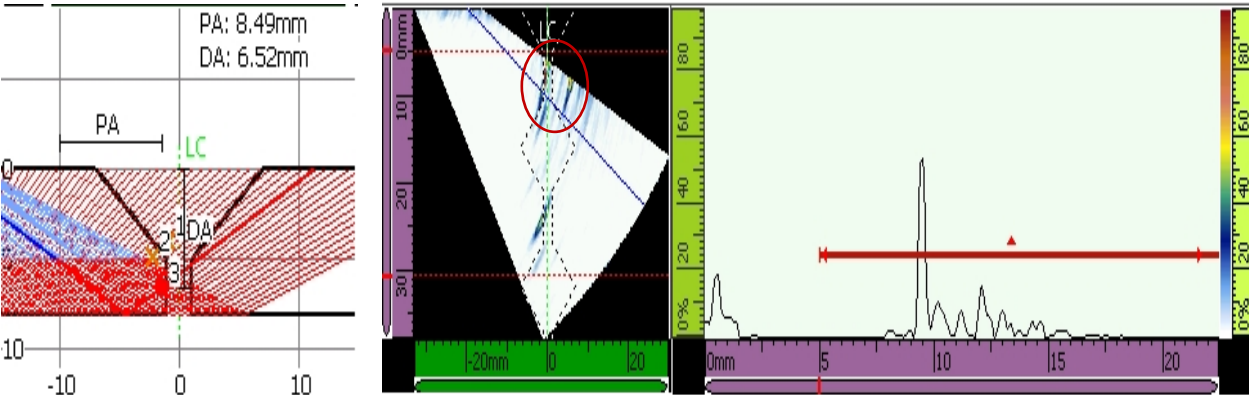


Tabla 12. Caracterización discontinuidad N° 3 placa de acero AISI 304

indicación de defecto	Posición sobre el eje de soldadura	Índice	Canal	A%	DA ^	PA^	SA^	AWS A	AWS C	AWS D	AWS CL
3	301.00 mm	-10.00 mm	63.00 °	54.8	6.52 mm	8.49 mm	20.89 mm	34.6 mm	0	3.3 db	A (70°)
Tipo de defecto: Falta de penetración						Según la norma toda indicación clasificada tipo A debe ser rechazada sin importar su longitud.					

Figura 77. Visualización discontinuidad N° 4 placa de acero AISI 304

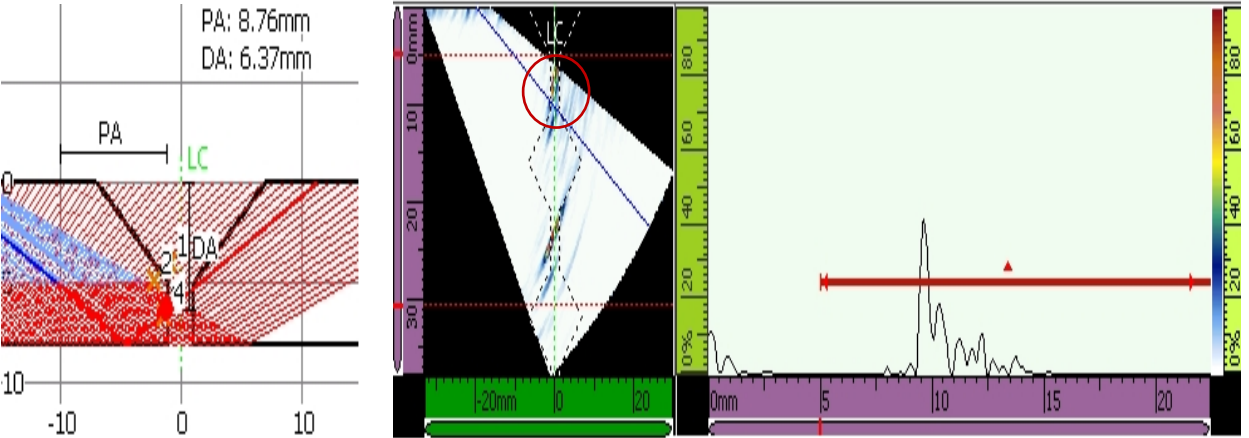


Tabla 13. Caracterización discontinuidad N° 4 placa de acero AISI 304

indicación de defecto	Posición sobre el eje de soldadura	índice	Canal	A%	DA ^	PA^	SA^	AWS A	AWS C	AWS D	AWS CL
4	28.00 mm	-10.00 mm	63.00 °	43.1 mm	6.37 mm	8.76 mm	21.20 mm	36.7	0	5.4 db	A (70°)
Tipo de defecto: Falta de penetración						Según la norma toda indicación clasificada tipo A debe ser rechazada sin importar su longitud.					

Figura 78. Visualización discontinuidad N° 5 placa de acero AISI 304

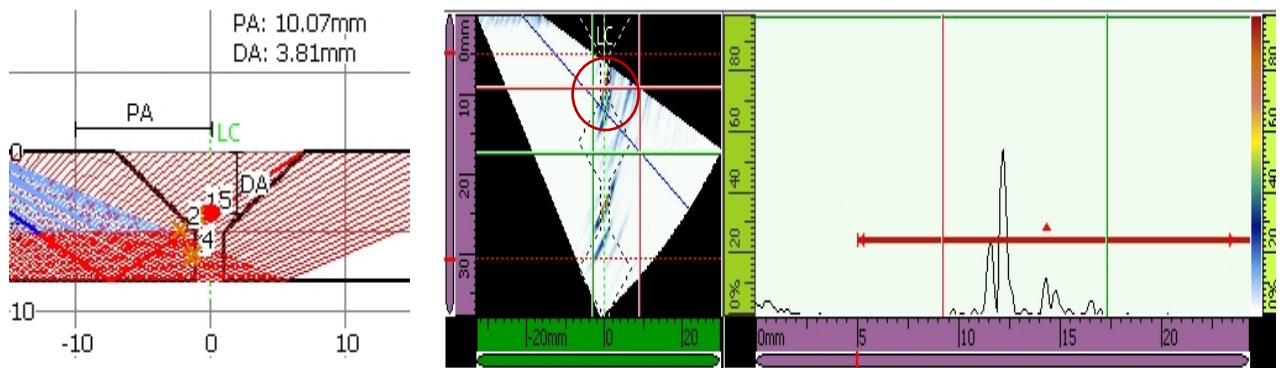


Tabla 14. Caracterización discontinuidad N° 5 placa de acero AISI 304

Indicación de defecto	Posición sobre el eje de soldadura	índice	Canal	A%	DA ^	PA^	SA^	AWS A	AWS C	AWS D	AWS CL
5	219.00 mm	-10.00 mm	60.50 °	55.8 mm	3.81 mm	10.07 mm	24.76 mm	34.4	0	3.1 db	A (70°)
Tipo de defecto: Inclusión de escoria						Según la norma toda indicación clasificada tipo A debe ser rechazada sin importar su longitud.					

Figura 79. Visualización discontinuidad N° 6 placa de acero AISI 304

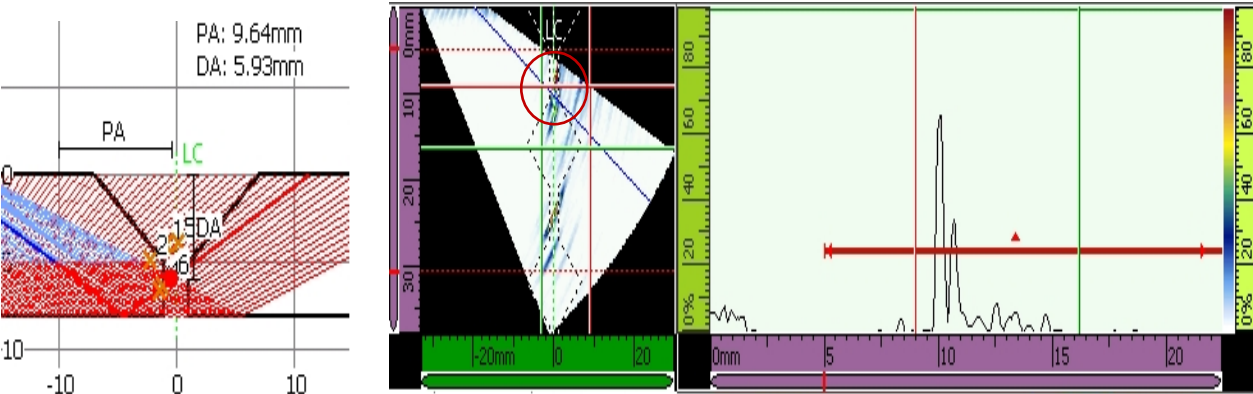


Tabla 15. Caracterización discontinuidad N° 6 placa de acero AISI 304

Indicación de defecto	Posición sobre el eje de soldadura	Índice	Canal	A%	DA ^	PA^	SA^	AWS A	AWS C	AWS D	AWS CL
6	219.00 mm	-10.00 mm	63.00 °	67.5	5.93 mm	9.64 mm	22.19 mm	32.8	0	1.5 db	A (70°)
Tipo de defecto: Falta de penetración						Según la norma toda indicación clasificada tipo A debe ser rechazada sin importar su longitud.					

Se concluye para las inspecciones en los cordones de soldadura que la metodología planteada permite detectar e identificar discontinuidades presentes y la adquisición de los datos para una caracterización posterior. Como se observa en los dos cordones de soldadura de las placas se evidencia claramente la falta de penetración en la raíz de la soldadura representado en las indicaciones obtenidas en el C-scan de la DATA total lo cual indica que la soldadura para las dos placas deberá ser rechaza en su totalidad ya que se encuentra en pésimas condiciones.

8. CONCLUSIONES

- Esta metodología le permite al ingeniero mecánico interesado en el ultrasonido con técnica Phased Array poder configurar y calibrar el equipo OmniScan MX2 para luego inspeccionar soldaduras y espesores en objetos con geometría plana con buenos resultados.
- Se puede concluir que con las pruebas realizadas los resultados obtenidos son correctos identificando y caracterizando los defectos inducidos en las placas de pruebas utilizadas validando la metodología presentada.
- El uso del VersaMOUSE en la inspección manual tanto de espesores como de líneas de soldadura permite hacer una inspección más ágil y detallada ofreciendo una oportunidad para obtener más datos de una manera más rápida y sencilla.
- La técnica de ultrasonido Phased Array es un avance notable respecto del ultrasonido convencional ya que permite inspecciones mucho más amplias y detalladas aumentando la capacidad de identificar discontinuidades y poder ubicarlas y caracterizarla de una manera más fácil respecto al ultrasonido convencional.
- El OmniScan mx2 presenta una gran exactitud en cuanto a la geometría, posición y dimensionamiento de las discontinuidades, siempre y cuando el equipo, así como el palpador y la zapata hayan sido configurados y calibrados de manera correcta.

9. RECOMENDACIONES

- Considerar el mantenimiento y el ensamble correcto del equipo brindado por Olympus en su guía rápida antes de utilizar el equipo OmniScan MX2 y el VersaMOUSE.
- La sonda y la zapata deben ser ensambladas de una manera correcta para asegurarse de contar con la correcta orientación de los haces ultrasónicos generados. la zapata cuenta con las indicaciones de 1 y 64 en las caras extremas. el 1 nos indica que desde esa cara se generar el primer elemento configurado mientras que el 64 el ultimo.
- La interfaz Sonda zapata debe ser lubricados con suficiente gel conductor, así como la interfaz Zapata pieza a inspeccionar para poder obtener resultados correctos y evitar daños en estos elementos.
- El ensamble del VersaMOUSE debe hacerse correctamente hay que tener cuidado de cómo se conecta el cable Encoder a este y como se conecta al puerto. Encoder del OmniScan MX2. el cable cuenta con un sistema de indicaciones que se debe seguir para evitar daños en los pines delicados del cable.
- El uso del VersaMOUSE con el tipo de zapatas utilizados en las pruebas realizadas debe hacerse acoplado con un sistema de lubricación constante. para futuras inspecciones se recomienda adquirir la bomba que envíe el gel lubricante a través de las platinas que cuentan con este sistema de lubricación. Esto mejorara notablemente los datos obtenidos, así como facilitara la inspección para el operario del equipo.
- El equipo OmniScan MX2 cuenta con muchas opciones de visualización como el Ray tracing para la inspección de soldadura el uso de estas opciones facilita la caracterización de las fallas en soldadura.

- Verificar las especificaciones técnicas de cada componente del equipo de ultrasonido que permita corroborar si es aceptable para las dimensiones del elemento a inspeccionar.

BIBLIOGRAFIA

American Welding Society. 2010. Código AWS D1.1 para soldadura estructural, Sección 6 – Inspección, Parte F- Inspección por ultrasonidos.

ECHEVERRIA, Ricardo. 2002. Defectología. Laboratorio de Ensayos no Destructivos. [En línea]. (Recuperado en 15 noviembre de 2018.) Recuperado en <https://www.slideshare.net/fabycach/defectologia>

ECHEVERRIA, Ricardo. 2002. Ultrasonido. Laboratorio de Ensayos no Destructivos. [En línea]. (Recuperado en 25 noviembre de 2018.) Recuperado en <https://www.slideshare.net/asacetecnologias/universidad-de-comahue-ultrasonido>

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA. 2008. Soldadura protocolo. Curso de Procesos de Manufactura. [En línea]. (Recuperado en 15 junio de 2018.) Disponible en https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/3637_soldadura.pdf

FIGUEROA VARÓN, Johan Andrés; SUAREZ ENCISO, Luis Alejandro. 2018. Instructivo de uso y operación para el equipo de ultrasonido usm 35x, bajo norma AWS D1.1. [En línea]. (Recuperado en 10 octubre 2018.) Disponible en <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/14256/1/FigueroaVaronJohanAndres2018SuarezEncisoLuisAlejandro2018.pdf>

FUQUEN SANABRIA, Oscar Miguel. 2014. Metodología para la inspección de soldadura de aceros austeníticos mediante ultrasonido (técnica) phased array. [En línea]. (Recuperado en 12 julio de 2018.) Disponible en <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/9857/Trabajo%20Final%20de%20Grado.pdf?sequence=1>

GARCÍA MEDINA, Veronia. 2013. Ultrasonidos, técnica no destructiva para el estudio de monumentos. [En línea]. (Recuperado en 25 noviembre de 2018.) Disponible en <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20370/fichero/Proyecto+Final+cd.pdf>

LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES. 2010. La prueba de ultrasonido, Proyecto papime clave: pe101110, pp 25-30. Disponible en http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/PRUEBA%20DE%20ULTRASONIDO.pdf.

León y Russo Ingenieros S.A.C. Curso Nivel I y II. Ultrasonido. [En línea]. (Recuperado en 25 mayo de 2018.) Disponible en <https://es.scribd.com/doc/105822227/Curso-de-Ultrasonido-Nivel-I-y-II>

MARINO RIVERA, José Pablo. 2014. Estudio de integridad estructural mediante ultrasonidos Phased Array. [En línea]. (Recuperado en 10 junio 2018.) Disponible en http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/334/1/Marino_Rivera_Jose_Pablo.pdf

OLYMPUS. 2007. Advances in Phased Array ultrasonic technology. Olympus NDT. [En línea]. (Disponible en 15 noviembre de 2018.) Recuperado en [https://www.olympus-ims.com/es/downloads/detail/?0\[downloads\]\[id\]=276824168](https://www.olympus-ims.com/es/downloads/detail/?0[downloads][id]=276824168).

OLYMPUS. 2017. Phased Array testing: Basic Theory for industrial applications. Olympus NDT. [En línea]. (disponible en 15 noviembre de 2018.) Recuperado en https://www.olympus-ims.com/es/.downloads/download/?file=285216102&fl=en_US

RIMOLDI Claudio; MUNDO Luis Mariano. 2012. Cátedra: ensayos no destructivos. Apunte de clase. Ensayo no destructivo por método de ultrasonido. [En línea]. (Recuperado en 1 julio de 2018.) Disponible en: <https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/A0006/>

SUAREZ. Carlos. (2011). INSPECCIÓN DE SOLDADURAS EMPLEANDO EL ENSAYO DE ULTRASONIDO EN LUGAR DE RADIOGRAFÍA. Tecnicontrol S.A. Chia. Recuperado de: <http://portal.tc.com.co/tecnicontrol/images/publicaciones/articulos/EmpleodeUTenlugardeRT.pdf>.

Ultrasonic Testing Level I. Non Destructive Testing –Service and Training NTD Level III (ASNT corporate partner).