

**DETERMINACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PRÁCTICA PARA EL  
CORRECTO USO DE LOS PALPADORES Y ZAPATAS DEL EQUIPO  
OMNISCAN PARA EL ENSAYO DE ULTRASONIDO PHASED ARRAY  
APLICADO EN ACEROS 1018, 1020 Y 1045**

**JULIO ANDRÉS FONSECA CASTRO  
WILSON YESID SUÁREZ MÉNDEZ**

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

**2018**

**DETERMINACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PRÁCTICA PARA EL CORRECTO  
USO DE LOS PALPADORES Y ZAPATAS DEL EQUIPO OMNISCAN PARA EL  
ENSAYO DE ULTRASONIDO PHASED ARRAY APLICADO EN ACEROS 1018,  
1020 Y 1045**

**JULIO ANDRÉS FONSECA CASTRO  
WILSON YESID SUÁREZ MÉNDEZ**

**Proyecto de grado para optar al título de ingeniero mecánico**

**DIRECTOR:  
HELLER GUILLERMO SÁNCHEZ ACEVEDO  
PhD EN INGENIERÍA MECÁNICA, APLICADA Y COMPUTACIONAL**

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

**2018**

## **DEDICATORIA**

A mi Dios y mi familia

**JULIO ANDRÉS FONSECA CASTRO**

A mi Dios, mi familia y a las personas que hicieron posible este sueño.

**WILSON YESID SUAREZ MENDEZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al SENA por su ayuda y puntualidad en la entrega de los patrones.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	18
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	19
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	19
1.2 OBJETIVOS .....	20
1.2.1 Objetivo General. ....	20
1.2.2 Objetivos Específicos.....	20
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	21
2. MARCO TEÓRICO .....	23
2.1 TÉRMINOS BÁSICOS DE ACÚSTICA .....	23
2.2 TIPOS DE ONDA.....	25
2.2.1 Según el Movimiento de sus Partículas .....	25
2.2.1.1 Ondas transversales o de corte. ....	25
2.2.1.2 Ondas longitudinales o de compresión. ....	26
2.2.1.3 Ondas Superficiales.....	26
2.2.2 Según su Periodicidad.....	27
2.2.2.1 Ondas periódicas. ....	27
2.2.2.2 Ondas no periódicas. ....	27
2.3 ONDA SONORA .....	27
2.3.1 Impedancia Acústica.....	27
2.3.2 Rangos de Frecuencia.....	28
2.3.3 Velocidad de Propagación.....	29
2.3.4 Fenómenos de las Ondas.....	29
2.3.4.1 Reflexión.....	29
2.3.4.2 Refracción.....	30

2.3.4.3 Difracción.....	31
2.3.4.4 Interferencia.....	32
2.3.4.5 Absorción.....	32
2.4 GENERACIÓN DE ULTRASONIDO.....	33
2.4.1 Métodos Mecánicos.....	33
2.4.2 Efecto Magnetoestrictivo.....	33
2.4.3 Efecto Piezoelectrico.....	33
2.5 DETECCIÓN DE IMPERFECCIONES Y LONGITUD DE ONDA.....	34
2.6 SISTEMA DE ULTRASONIDO PHASED ARRAY.....	35
2.6.1 Principio de Funcionamiento del Phased Array.....	37
2.6.2 Ley Focal.....	39
2.6.2 Barrido Lineal.....	39
2.6.3 Barrido Sectorial.....	39
2.6.4 Palpador de Haz Angular.....	40
2.6.5 Localización de Discontinuidades.....	41
2.7 PROCESOS DE UNIÓN.....	44
2.7.1 Proceso de Soldadura.....	44
2.7.2 Determinación de los Defectos en el Proceso de Soldadura.....	46
2.7.2.1 Inclusión de escoria.....	48
2.7.2.2 Fusión incompleta.....	49
2.7.2.3 Grietas.....	49
2.7.2.4 Porosidades.....	51
2.7.3 Normas Aplicadas al Proceso de Soldadura.....	51
2.7.4 Aspectos a Considerar para la Inspección.....	52
2.7.4.1 Juntas.....	52
2.7.4.2 Tipos de ranura.....	53
2.8 APLICACIÓN DE LA TECNICA.....	54
2.8.1 Inspección en Soldadura.....	54
2.8.2 Zona de Barrido.....	55
2.8.3 Formas de Representación de Datos.....	59

3. METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DEL PALPADOR Y LA ZAPATA EN EL EQUIPO OMNISCAN MX2 .....	60
3.1 PROBETA DE CALIBRACIÓN V1 .....	60
3.2 CONFIGURACIÓN DE LA PIEZA Y LA SOLDADURA .....	62
3.2.1 Configuración de la Pieza. ....	62
3.2.2 Configuración de la Soldadura .....	63
3.3 CONFIGURACIÓN DEL PALPADOR Y LA ZAPATA .....	63
3.4 CONFIGURACIÓN DE LA LEY FOCAL .....	65
3.5 CALIBRACIÓN DE VELOCIDAD, SENSIBILIDAD Y RETARDO.....	66
3.5.1 Velocidad del Material.....	67
3.5.1.1 Posición de la zapata en la probeta .....	69
3.6.1 Retardo de la Zapata .....	71
3.6.2 Sensibilidad de la Zapata.....	72
4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN LA DETECCIÓN DE FALLAS EN SOLDADURAS DE LOS ACEROS 1018, 1020,1045. ....	74
4.1 CONFIGURACIÓN DE LA ZAPATA PARA LA LECTURA DE LA SOLDADURA .....	74
4.1.1 Lectura de la Simbología de la Pantalla del Omniscan.....	77
4.1.2 Lectura de las Distintas Fallas en una Soldadura. ....	77
5. RESULTADOS OBTENIDOS.....	80
6. CONCLUSIONES .....	87
7. RECOMENDACIONES.....	88
BIBLIOGRAFIA .....	89

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Onda senoidal.....	24
Figura 2. Frente de onda .....	25
Figura 3. Onda transversal .....	26
Figura 4. Onda longitudinal.....	26
Figura 5. Incidencia angular.....	29
Figura 6. Reflexión de una onda .....	30
Figura 7. Refracción.....	30
Figura 8. Difracción de onda.....	31
Figura 9. Interferencia de ondas .....	32
Figura 10. Absorción de onda.....	32
Figura 11. Omniscan mx2.....	36
Figura 13. Comparación entre ultrasonido convencional y phased array .....	37
Figura 14. Diagrama de proceso de un sistema de ultrasonido phased array .....	38
Figura 15. Barrido sectorial y barrido lineal.....	40
Figura 16. Haz emitido.....	40
Figura 17. Distancia de medio salto y un salto .....	41
Figura 18. Discontinuidad detectada.....	42
Figura 19. Discontinuidad en segunda pierna.....	43
Figura 20. Inclusión de escoria .....	48
Figura 21. Fusión incompleta.....	49
Figura 22. Grietas longitudinales .....	50
Figura 23. Grieta transversal y cráter.....	50
Figura 24. Porosidad con discontinuación uniforme .....	51
Figura 25. Juntas comunes en soldadura .....	53
Figura 26. Tipos de ranura.....	53
Figura 27. Registro de una inspección de soldadura por phased array .....	54

Figura 28. Salto y medio salto.....	55
Figura 29. Zona de barrido .....	55
Figura 30. Movimientos del palpador en la zona de barrido .....	56
Figura 31. Técnica de los 6 dB .....	58
Figura 32. Equipo Omniscan mx2.....	60
Figura 33. Probeta de calibración V1 .....	60
Figura 34. Plano de Probeta de calibración V1 .....	61
Figura 35. Menú principal equipo Omniscan mx2 .....	61
Figura 36. Menús de la opción pieza y soldadura.....	62
Figura 37. Opciones de soldadura del omniscan .....	63
Figura 38. Menú calibración palpador y zapata .....	64
Figura 39. Palpador A2 .....	64
Figura 40. Zapata N55S.....	64
Figura 41. Configuración ley focal.....	66
Figura 42. Patrones de calibración V1 .....	66
Figura 43. Menú de calibración de la velocidad del material .....	67
Figura 44. Opciones de selección de medida .....	68
Figura 45. Opciones de medida en el MX2 .....	68
Figura 46. Calibración de velocidad.....	69
Figura 47. Radios de la probeta.....	69
Figura 48. Posicionamiento de la puerta.....	69
Figura 49. Toma de referencia del radio de 25mm .....	70
Figura 50. Toma de referencia del radio de 28 mm .....	70
Figura 51. Velocidad del sonido en el material .....	71
Figura 52. Ubicación del palpador para el retardo de la zapata.....	71
Figura 53. Calibración del retardo de zapata .....	72
Figura 54. Calibración sensibilidad de la Zapata .....	72
Figura 55. Calibración de sensibilidad de la zapata.....	73
Figura 56. Elementos para las pruebas con soldadura.....	74
Figura 57. Configuración de la geometría de la soldadura .....	76

Figura 58. Inspección de fallos en soldadura.....	76
Figura 59. Simbología del Omniscan .....	77
Figura 60. Falta de fusión .....	77
Figura 61. Penetración en la raíz .....	78
Figura 62. Fisura.....	78
Figura 63. Carencia de fusión interna .....	78
Figura 64. Porosidad.....	79
Figura 65. Cavidad de raíz.....	79
Figura 66. Fisura transversal .....	79
Figura 67. Cordón de soldadura en las placas de acero 1020 y 1045 .....	80
Figura 68. Zona de barrido .....	81
Figura 69. Asíntotas del omniscan.....	82
Figura 70. Datos arrojados por el omniscan .....	82

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Procesos de unión .....	44
Tabla 2. Discontinuidades externas e internas .....	48
Tabla 3. Clasificación de grietas en soldadura .....	49
Tabla 4. Grietas y sus características .....	50
Tabla 5. Ganancia en dB para la calibración del acero 1018.....	75
Tabla 6. Ganancia en dB para la calibración del acero 1045.....	75
Tabla 7. Ganancia en dB para la calibración del acero 1020.....	75
Tabla 8. Soldadura en ranura tipo V .....	83
Tabla 9. Soldadura en ranura tipo V doble .....	84
Tabla 10. Soldadura en ranura tipo U .....	84
Tabla 11. Soldadura en ranura tipo U doble .....	85
Tabla 12. Soldadura en ranura cuadrada sencilla.....	86

## **LISTA DE ANEXOS**

“Ver Anexos Adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en las base de datos de la Biblioteca UIS”

**ANEXO A. MANUAL DE CALIBRACIÓN DE PALPADORES Y ZAPATAS DEL OMNISCAN MX2**

## RESUMEN

**TÍTULO:** DETERMINACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PRÁCTICA PARA EL CORRECTO USO DE LOS PALPADORES Y ZAPATAS DEL EQUIPO OMNISCAN PARA EL ENSAYO DE ULTRASONIDO PHASED ARRAY APLICADO EN ACEROS 1018, 1020 Y 1045\*

**AUTORES:** JULIO ANDRÉS FONSECA CASTRO, WILSON YESID SUÁREZ MÉNDEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Ultrasonido, omniscan mx2, soldadura, detección de fallas, palpadores, zapatas.

### **DESCRIPCIÓN:**

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de una metodología practica que permita a los estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander utilizar correctamente el equipo omniscan mx2 para detectar fallas en soldaduras.

Para la realización de la metodología se utilizó el equipo onminscan mx2, el palpador 5L64-A12 y la zapata SA12-N55S, instrumentos portátiles con los cuales se pueden realizar detecciones de imperfecciones en estructuras y soldaduras. Se describe paso a paso como se desarrollan las pruebas en soldaduras tipo V, V doble, U, U doble y plana. se muestra la forma de configurar correctamente tanto la zapata como el palpador para la calibración de velocidad, retardo de zapata y sensibilidad utilizando los patrones V1 de acero 1018,1020 y 1045. Posteriormente se presenta un análisis de fallos en soldaduras con lo cual se pretende poner a prueba la metodología y aplicar los conceptos y técnicas aprendidas en el laboratorio a una situación real.

Ya afianzando la utilización de la técnica para la detección de las fallas y la correcta calibración, le da una herramienta al ingeniero mecánico la cual le ofrece un valor agregado en la industria, ya que la tecnología Phased Array no es muy utilizada en la industria colombiana pero si brinda una mejor detección de fallas y en su defecto un mejor tratamiento de las mismas.

---

\* 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:** DETERMINATION OF A PRACTICAL METHODOLOGY FOR THE CORRECT USE OF THE OMNISCAN EQUIPMENT PADS AND WEDGE FOR THE PHASED ARRAY ULTRASOUND TEST APPLIED IN STEELS 1018, 1020 AND 1045.\*

**AUTHORS:** JULIO ANDRES FONSECA CASTRO, WILSON YESID SUAREZ MENDEZ\*\*

**KEYWORDS:** Ultrasound, omniscan mx2, welding, fault detection, probes, wedge.

### DESCRIPTION

The objective of this project is the development of a practical practice that the students of mechanical engineering of the Industrial University of Santander correctly use the omniscan mx2 equipment to detect flaws in welds.

For the realization of the methodology, the equipment can be used in minscan mx2, the 5L64-A12 probe and the SA12-N55S shoe, instruments with which imperfection detection in structures and welds can be carried out. It is described step by step as described in the tests in welds type V, double V, U, double U and flat. It shows how to correctly configure both the shoe and the probe for speed calibration, shoe delay and sensitivity using steel patterns V1 1018, 1020 and 1045. Subsequently, a failure analysis in welding is presented with what is Test the methodology and apply the concepts and techniques learned in the laboratory to a real situation.

Afiizando the use of the technique for the detection of faults and the correct calibration, the tool for the mechanical engineer which is an added value in the industry, the phased technology is not very appropriate in the Colombian industry but if you get a better fault detection and, failing that, a better treatment of them.

---

\* Degree Work

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

## INTRODUCCIÓN

Los ensayos no destructivos en soldaduras son técnicas no invasivas para determinar la integridad de un material, componente o estructura, o para medir cuantitativamente características de un objeto. La técnica de ultrasonido permite la detección y caracterización de manera más precisa que los procedimientos comunes aplicados a la inspección en soldaduras.

Los ensayos no destructivos son aplicados a la inspección de productos semi-acabados o acabados, detectando heterogeneidades tanto superficiales como internas. En cuanto a los problemas de defectología, caracterización y metrología, hay cuatro etapas básicas de inspección que son: la elección del método de inspección, obtención de la indicación, interpretación de la indicación y evaluación de la indicación. En lo que respecta al método de inspección, existen varios tipos, partiendo del más sencillo, como la inspección visual, pasando por los líquidos penetrantes, partículas magnéticas, ensayos radiográficos y por último ensayo de ultrasonido.

Los escáneres ultrasónicos de hoy en día permiten realizar inspecciones por ambos lados de la soldadura sin importar que se analice en placas o en tuberías; uno con el haz de ultrasonido orientado perpendicular a la soldadura y el otro con el haz paralelo a la soldadura, siendo una de estos escáneres el phased array.

A continuación, se establece la metodología para la detección de fallas en soldaduras y placas empleando el ultrasonido Omniscan MX2, con la técnica del phased array.

# 1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

## 1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La diferencia entre remachar y soldar las piezas es que, en esta última, las partes son inseparables, las uniones son más sencillas y tiene mejor apariencia. Sin embargo, durante el proceso de soldadura pueden surgir inconvenientes como deformaciones, penetración insuficiente, uniones defectuosas que generan fisuras internas o externas con depósitos de óxido y poros. Además, la medida principal usada para juzgar la calidad de la soldadura es su dureza y la dureza del material alrededor de ella. Varios factores influyen en esto, incluyendo el método de soldadura, la cantidad y la concentración de la entrada de calor, el material base, el material de relleno, el material fundente, el diseño del empalme entre otros.

Posterior al proceso de soldadura, pueden encontrarse tres tipos de discontinuidades que son: inherentes, cuando son introducidas durante la producción inicial del estado de fundición de procesos, causadas por los procesos posteriores al estado de fundición y de servicio que surgen debido al uso del producto final en condiciones de carga o ambiente.

Los defectos que pueden encontrarse en una inspección de soldadura pueden organizarse en seis grupos que son: fisuras y grietas, cavidades y poros, inclusiones sólidas, falta de fusión y penetración, defectos de forma externos y defectos varios. Los ensayos no destructivos permiten detectar dichos defectos, medirlos y caracterizarlos, partiendo de una inspección visual, siendo esta la más sencilla, hasta llegar a una inspección por ultrasonido, que es la más completa y precisa y que analiza tanto la superficie externa de la soldadura como la interna de la misma.

En Colombia, la principal refinería tiene más de 50 años de funcionamiento, esto conlleva a que las vasijas y líneas de transporte y producción tengan desgastes y fisuras, sin contar con que muchos de estos elementos ya cumplieron su vida útil. De igual forma, existen otros elementos en la industria que están sujetos a un alto grado de exigencia, cuidado y precaución al ser manipulados, por ejemplo: cilindros para buceo, torres de destilación, calderas de producción de vapor, reservorios hidráulicos, todo tipo de extrusiones, trampas de vapor, rodamientos, bombas, uniones soldadas etc.

Es por ello que debe utilizarse un diagnóstico 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 la superficie como en el interior de la pieza; además de ser versátil para la adquisición de distintos datos, armado y la manipulación en zonas de alta complejidad topográfica.

## **1.2 OBJETIVOS**

**1.2.1 Objetivo General.** Determinar una metodología práctica para la correcta calibración y utilización de los palpadores y zapatas del equipo Omniscan para el ensayo de ultrasonido Phased Array con el fin de detectar fallas de soldaduras en aceros comerciales 1018, 1020 y 1045

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Elaborar el manual de calibración de dos palpadores y las zapatas respectivas para la realización de una inspección con ultrasonido.
- Fabricación de tres patrones de calibración de los siguientes materiales: acero 1018, 1020, 1045.
- Implementar cinco pruebas de laboratorio para la aplicación de la técnica de ultrasonido en la detección de fallos en soldaduras de diferentes topologías.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

Para evitar paros y pérdidas en la producción, daños superficiales y/o internos en la maquinaria, desastres ambientales, además de sobrecostos en operaciones y reparaciones, se necesitan técnicas de detección de las posibles fallas en los materiales y soldaduras.

Este trabajo de grado tiene por objeto apropiarse de la técnica de ultrasonido phased array, que permite realizar la detección de fallas en soldaduras las cuales pueden provocar derrames y fugas en sistemas de presión y vacío, cavitación en bombas; del mismo modo saber la integridad de empaques y sellos, análisis de válvulas, etc.

En la industria se realizan diferentes ensayos para saber el estado y la calidad de la pieza de trabajo, esta inspección es muy importante puesto que su objetivo primordial es la detección de heterogeneidades internas de las mismas (grietas, inclusiones o poros), cuya presencia modifica las propiedades físicas del material.

Actualmente se utilizan ensayos no destructivos, estos ensayos se caracterizan por emplear diferentes métodos físicos que permiten inspeccionar la pieza sin modificarla, es decir, que después del ensayo puede seguir cumpliendo su función. Entre los tipos de ensayos están: examen visual, partículas magnéticas, tintas penetrantes, ultrasonido y técnicas radiográficas.

Una de las técnicas utilizadas es ultrasonido, específicamente el Phased Array, ya que permite hacer medición de distancia, profundidad, detección de defectos y discontinuidades tanto en la superficie como en el interior de la pieza; además de ser versátil para la adquisición de distintos datos, armado y la manipulación en zonas de alta complejidad topográfica. Sus características más importantes son:

- **Seguridad:** Sustituye al examen radiográfico, lo que evita el riesgo de la utilización de radiaciones ionizantes, sin necesidad de parar la producción.
- **Velocidad:** Debido a la capacidad de exploración, aumenta la velocidad del examen.
- **Registro:** Permite registrar la inspección del modo más adecuado para su interpretación y evaluación.
- **Flexibilidad:** Realizar una gran variedad de tipos de exploración para la detección de diferentes tipos de defectos localizados en distintas configuraciones y componentes.
- **Archivo:** Archiva los registros en diferentes formatos y la totalidad de los datos adquiridos de las señales, pudiendo realizar nuevas evaluaciones en el momento que se requiera.

Este tipo de ensayo permite reducir el tiempo de inspección, arrojando datos precisos, barriendo el total de la zona tanto interna como externa que se va a inspeccionar y proporcionando resultados instantáneos; además, el omniscan es un equipo portátil y liviano.

Como evidencia del trabajo realizado, se elabora un manual de calibración del equipo de ultrasonido omniscan, con enfoque en detección de discontinuidades en soldaduras.

## 2. MARCO TEÓRICO

Dentro del campo del mantenimiento preventivo, se encuentra el ensayo no destructivo con ultrasonido, el cual nos brinda una gran cantidad de información precisa del comportamiento de los desgastes de los aceros tanto en el interior como en el exterior de la pieza.

La inspección por ultrasonido se define como un procedimiento de inspección no destructivo de tipo mecánico y su funcionamiento se basa en la impedancia acústica, que se manifiesta como el producto de la velocidad máxima de propagación del sonido y la densidad del material.

Cuando se inventó este procedimiento, se medía la disminución de intensidad de energía acústica cuando se hacían viajar ondas supersónicas en un material, requiriéndose el empleo de un emisor y un receptor. Actualmente se utiliza un único aparato que funciona como emisor y receptor, basándose en la propiedad del sonido de reflejarse al alcanzar una interfase acústica<sup>1</sup>.

### 2.1 TÉRMINOS BÁSICOS DE ACÚSTICA

**Frecuencia (f):** en la detección de fallas a través del contacto de dos o más elementos, se utilizan frecuencias entre 2.25 y 10 MHz. Teniendo en cuenta este rango, las altas frecuencias proporcionan mayor sensibilidad en la detección de pequeñas discontinuidades, pero no tiene la penetración que ofrecen las bajas frecuencias.

---

<sup>1</sup> L. Angrisani, L. Bechou, D. Dallet, P. Daponte, Y. Ouesten. Detection and location of defects in electronic devices by means of scanning ultrasonic microscopy and the wavelet transform measurement, Volume 31, Issue 2, March 2002, pagina 77.

**Amplitud (A):** es una medida de variación máxima del desplazamiento u otra magnitud física que varía periódica o cuasi periódicamente con el tiempo.

**Atenuación de onda:** es la disminución de su intensidad a medida que se aleja del foco. Se debe exclusivamente al reparto de su energía entre una superficie cada vez mayor.

**Velocidad de propagación:** depende del material por el cual se esté propagando la onda y de sus propiedades. En los aceros, la velocidad básica de propagación es de 5890 m/s; si el acero tiene tratamiento térmico, basado en cuál, su velocidad puede aumentar o disminuir.

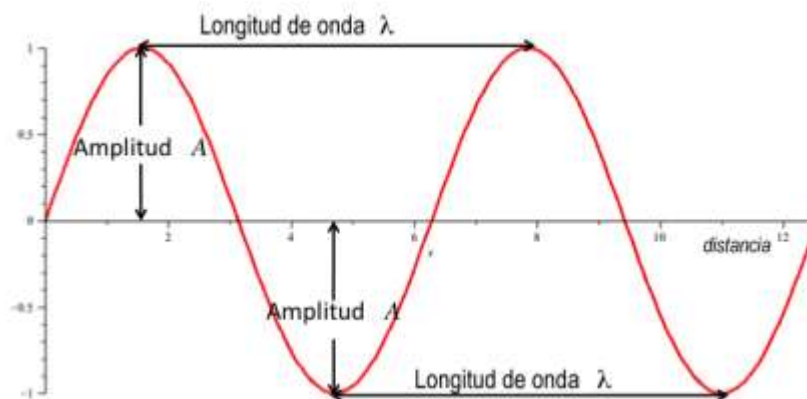
**Longitud de onda:** es la distancia real que recorre una perturbación (onda) en un determinado intervalo de tiempo. Ese intervalo de tiempo es el transcurrido entre dos máximos consecutivos de alguna propiedad física de la onda.

Si se tiene en cuenta la frecuencia de la onda, la longitud de onda sería

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.1)$$

A continuación, en la figura 1 se muestra una onda senoidal con la amplitud y longitud de onda,

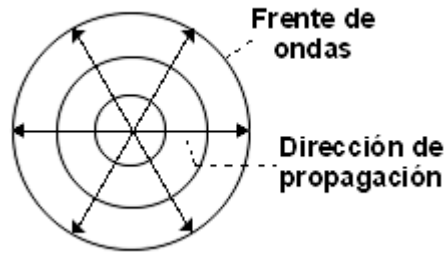
Figura 1. Onda senoidal



Fuente: <https://lidiakonlaquimica.wordpress.com/tag/longitud-de-onda/>

**Frente de onda:** superficie de onda que se encuentra más alejada del punto de inicio de la vibración, que se forma en cada instante que la onda alcanza puntos de idéntica fase. Ver figura 2.

Figura 2. Frente de onda



Fuente: <https://www.colegioweb.com.br/nocoes-gerais-de-ondas/frente-de-onda-e-raio-de-onda.html>

## 2.2 TIPOS DE ONDA

Las ondas se han clasificado según el movimiento de sus partículas, de acuerdo al medio en el que se propagan, según su propagación o periodicidad.

### 2.2.1 Según el Movimiento de sus Partículas

- Longitudinales o de compresión
- Ondas de corte o transversales
- Ondas superficiales o de Rayleigh
- Ondas de Lamb o de placa

2.2.1.1 Ondas transversales o de corte. El desplazamiento del medio es perpendicular a la dirección de propagación de la onda; estas ondas viajan aproximadamente, a la mitad de la velocidad que viajan las ondas longitudinales, del mismo modo, penetran el material mediante un palpador que va sobre una

zapata con un ángulo diferente de  $90^\circ$  respecto a la superficie del material. Ver figura 3.

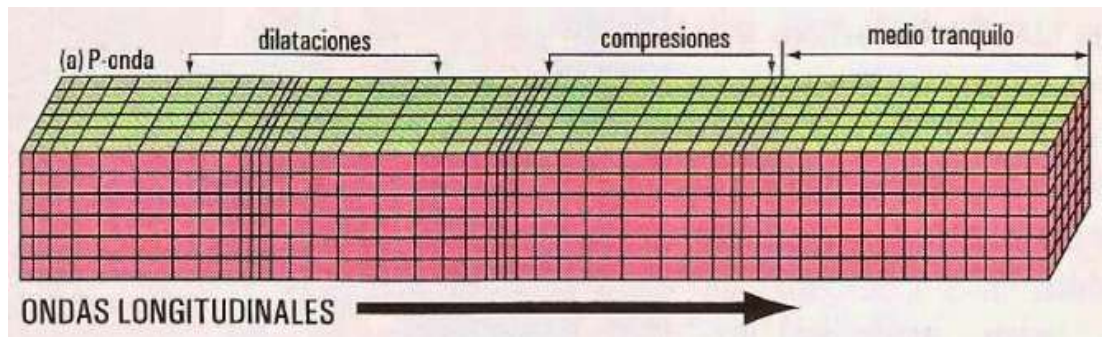
Figura 3. Onda transversal



**Fuente:** <https://lidiakonlaquimica.wordpress.com/tag/ondas-transversales/>

2.2.1.2 Ondas longitudinales o de compresión. Son ondas en las que el desplazamiento, a través del medio, está en la misma dirección o en la dirección opuesta a la dirección de desplazamiento de la onda, tal como se ilustra en la figura 4.

Figura 4. Onda longitudinal



**Fuente:** <http://anadnesclavas.blogspot.com.co>

2.2.1.3 Ondas Superficiales. Son ondas especiales de corte en las cuales, las partículas se confinan a una mínima profundidad en el material.

## 2.2.2 Según su Periosidad

2.2.2.1 Ondas periódicas. Son aquellas que son producidas por ciclos repetitivos de perturbaciones.

2.2.2.2 Ondas no periódicas. Son aquellas que son producidas por una perturbación aislada

## 2.3 ONDA SONORA

**2.3.1 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.<sup>2</sup>

$$Z = \rho \cdot v \quad (2.2)$$

$Z$  = Impedancia acústica, gramos / cm<sup>2</sup> s.

$\rho$  = Densidad del material, gramos / cm<sup>3</sup>.

$v$  = 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.

---

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

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

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

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

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.

**2.3.2 Rangos de Frecuencia.** Se sabe que no todo el rango de frecuencias es audible para el oído humano. El límite inferior de audibilidad se halla alrededor de 16Hz y el superior alrededor de 20KHz: los rangos de interés son:

**Frecuencias subsónicas:** son todas aquellas por debajo del rango de frecuencia audible para el humano, es decir, por debajo de 20Hz. No se escucha ningún tono, solo se notará presión.

**Frecuencias sónicas:** rango de frecuencia audible por el ser humano, 20Hz a 20KHz.

**Frecuencias ultrasónicas:** rango de frecuencias mayores a 20KHz.

Para los ensayos de ultrasonido, las frecuencias se encuentran en el rango de 0.5 a 25MHz.

**2.3.3 Velocidad de Propagación.** La velocidad del sonido varía dependiendo del medio a través del cual viajen y de la densidad el mismo.

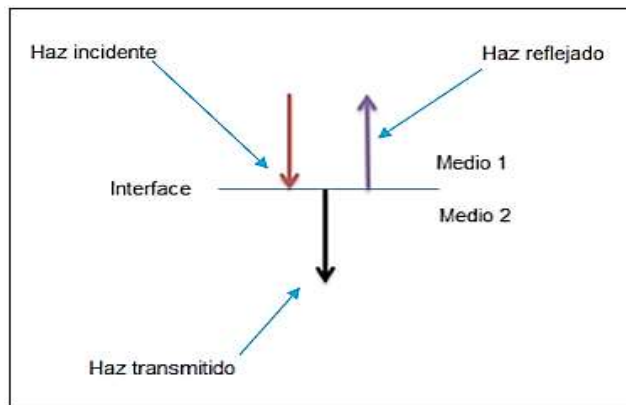
Considerando la relación de Poisson se tiene la ecuación 2.5:

$$V = \sqrt{\frac{e}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu).(1-2\mu)}} \quad (2.5)$$

Lo que concluye que la velocidad del sonido no depende ni de la frecuencia ni de la amplitud, sino del medio en que se propaga.

**2.3.4 Fenómenos de las Ondas.** Un haz sonoro tiene la facultad de ser proyectado, tanto transversalmente como oblicuamente, hacia la superficie de un material. Cuando el haz es transversal a la superficie se produce la transmisión y reflexión, que se conoce como incidencia de haz normal, ver figura 5.

Figura 5. Incidencia angular

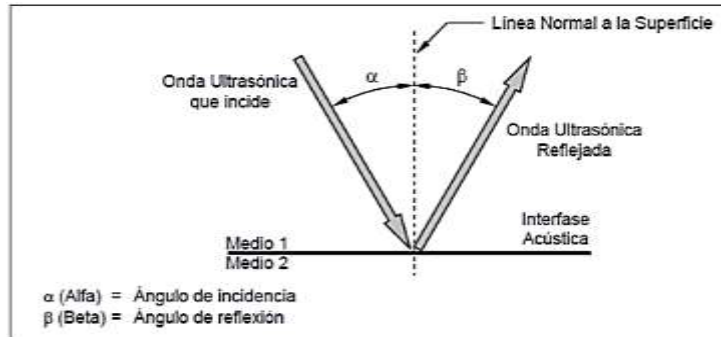


Fuente: inspección e ingeniería Anzoátegui, C.A.

**2.3.4.1 Reflexión.** Al incidir 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. Este fenómeno es llamado REFLEXION y es el causante del eco en el instrumento de ensayo<sup>3</sup>, ver figura 6.

Figura 6. Reflexión de una onda

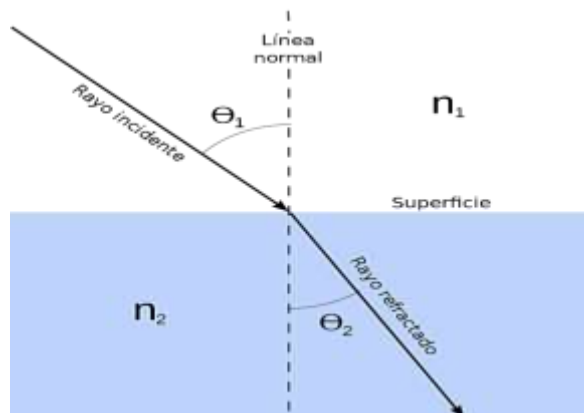


Fuente: inspección e ingeniería Anzoátegui, C.A.

El seno del ángulo de incidencia es igual al seno del ángulo de reflexión, o sea:  $\alpha = \beta$ . Dónde:  $\alpha$  = ángulo de incidencia y  $\beta$  = ángulo de reflexión.

2.3.4.2 Refracción. Cuando un haz ultrasónico pasa de un medio a otro con diferente velocidad y además con un ángulo de incidencia que no sea normal con respecto a la superficie que separa los dos medios. Ver figura 7.

Figura 7. Refracción



Fuente: [http://www.wikiwand.com/es/Índice\\_de\\_refracción](http://www.wikiwand.com/es/Índice_de_refracción)

<sup>3</sup> Rimoldi. Claudio, Mundo. Luis. Ensayos no destructivos. Apuntes de clase. P. 10.

Los ángulos de las ondas de incidencia y refractadas cumplen con la “Ley de Snell”, ecuación (2.6); como se utiliza en la inspección ultrasónica, se expresa como sigue:

$$\frac{\sin(\theta_1)}{n_1} = \frac{\sin(\theta_2)}{n_2} \longrightarrow \frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.6)$$

Dónde:

$\theta_1$  = Ángulo entre la línea normal a la interface acústica y la onda ultrasónica que incide, en el medio 1.

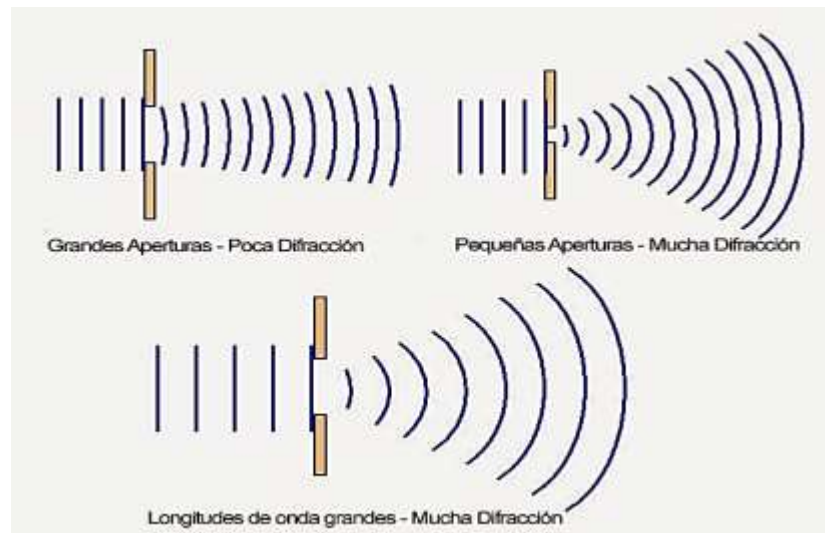
$\theta_2$  = Ángulo entre la línea normal a la interface acústica y la onda ultrasónica refractada, en el medio 2.

$n_1$  = Velocidad de la onda en el medio 1.

$n_2$  = Velocidad de la onda en el medio 2.

2.3.4.3 Difracción. Se observa cuando una onda atraviesa una rejilla cuyo tamaño es del orden de su longitud de onda tal como se ilustra en la figura 8.

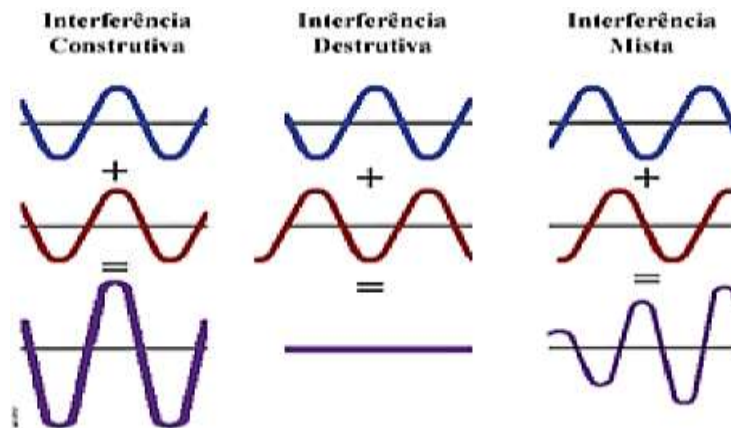
Figura 8. Difracción de onda



Fuente: [http://elfisicoloco.blogspot.com.co/2013/02/difraccion\\_5.html](http://elfisicoloco.blogspot.com.co/2013/02/difraccion_5.html)

2.3.4.4 Interferencia. Es un fenómeno en el cual dos o más ondas se superponen para formar una onda resultante de mayor, menor o igual amplitud. Ver figura 9.

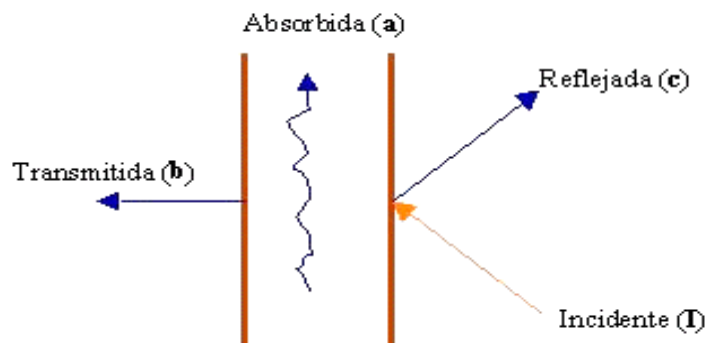
Figura 9. Interferencia de ondas



Fuente: <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/interferondas.html>

2.3.4.5 Absorción. Cuando una onda sonora alcanza una superficie, la mayor parte de su energía es reflejada, pero un porcentaje de esta es absorbido por el nuevo medio. Todos los medios absorben un porcentaje de sonido que propagan, este fenómeno se ilustra en la figura 10.

Figura 10. Absorción de onda



Fuente: <http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas.htm>

Existe coeficiente de atenuación acústica que indican la cantidad de atenuación sónica por unidad de longitud de recorrido del sonido, para un determinado material. La atenuación sónica, además del material, también depende de la frecuencia y el tipo de onda<sup>4</sup>.

## **2.4 GENERACIÓN DE ULTRASONIDO**

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:

**2.4.1 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.

**2.4.2 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 reciproco, lo que permite a su vez emisión y recepción de las ondas ultrasónicas.

**2.4.3 Efecto Piezoelectrico.** 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

---

<sup>4</sup> Rimoldi. Claudio, Mundo. Luis. Ensayos no destructivos. Apuntes de clase. P. 10

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<sup>5</sup>.

## **2.5 DETECCIÓN DE IMPERFECCIONES Y LONGITUD DE ONDA**

Al realizar ensayos no destructivos con ultrasonido, se debe decir la frecuencia de la onda a utilizar, ya que, cualquier cambio en ella me va a producir de igual manera un cambio en la longitud de onda del sonido ya que su velocidad es constante. Sin embargo, la longitud de onda del ultrasonido utilizada influye de manera significativa en la detección de discontinuidades.

Por regla general, una discontinuidad para tener una probabilidad de ser detectada, debe tener un largo de, por lo menos, la mitad de la longitud de onda.

Dos términos comúnmente utilizados en la inspección con ultrasonido son la resolución y la sensibilidad. La sensibilidad es la capacidad de detectar pequeñas discontinuidades durante el ensayo, este se incrementa al incrementar la frecuencia. Resolución es la capacidad del omnicán de detectar fisuras situadas muy cerca de los bordes, de igual manera este parámetro aumenta cuando es incrementada la frecuencia.

Por otro lado, si se aumenta de manera desproporcionada la frecuencia, se puede afectar la capacidad del instrumento de manera adversa puesto que las ondas de sonido tienden a dispersarse en materiales con estructuras de granos gruesos como las piezas fundidas. Así mismo, al hacer este aumento de frecuencia se genera una reducción en la capacidad de penetración de la medición.

---

<sup>5</sup> Rimoldi. Claudio, Mundo. Luis. Ensayos no destructivos. Apuntes de clase. P. 15

## 2.6 SISTEMA DE ULTRASONIDO PHASED ARRAY

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 otro 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 11), 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.<sup>6</sup>

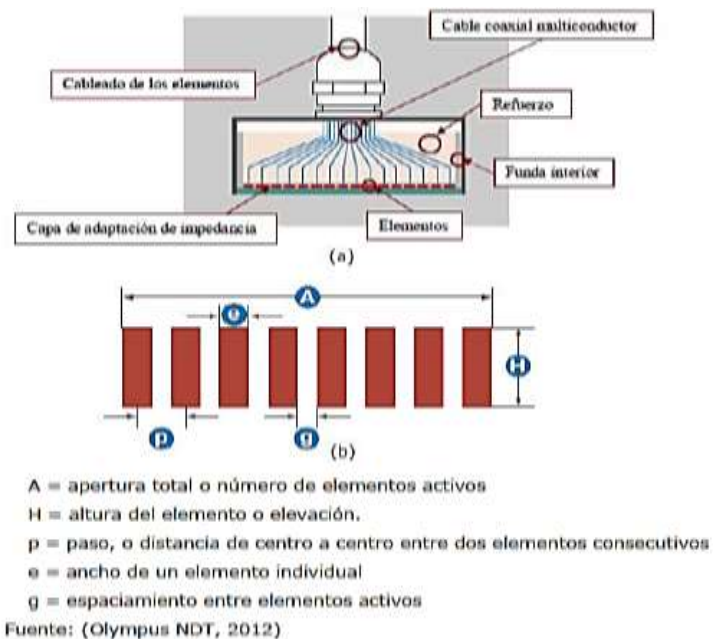
---

<sup>6</sup> Olympus. Curso de ultrasonido phased array. Índice.

Figura 11. Omniscan mx2



Figura 12. Estructura básica de un palpador phased array (a) partes del palpador, (b) partes de los elementos piezoelectricos



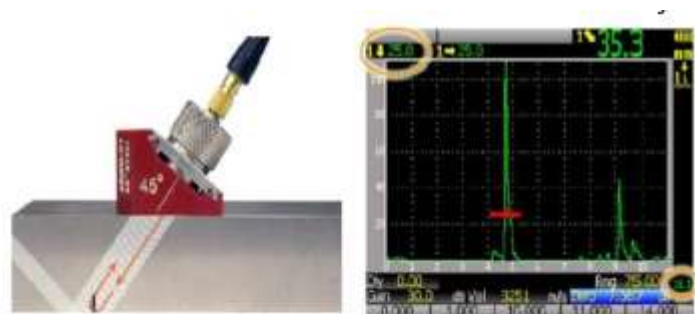
Fuente: Olympus

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

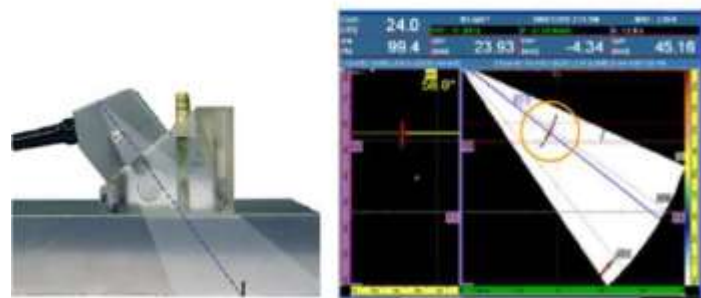
diferentes profundidades, lo que aumenta la flexibilidad y la capacidad de las configuraciones para la inspección. (Olympus NDT, 2012)

En la Figura 13, la parte (a) se observa el proceso del ultrasonido convencional, mientras en la parte (b) se muestra el funcionamiento básico de la técnica de *Phased Array*.

Figura 13. Comparación entre ultrasonido convencional y phased array



(a) Ultrasonido convencional



(b) Ultrasonido técnica de *Phased Array*

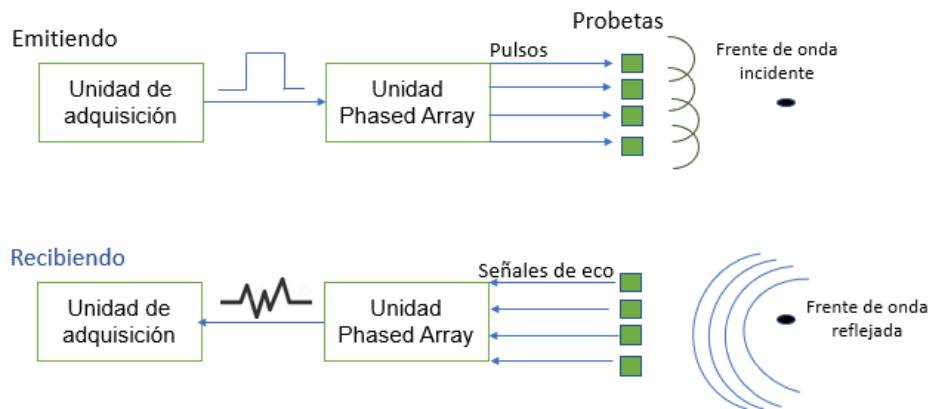
**Fuente:** Olympus NDT 2012

**2.6.1 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.

En la Figura 14 se puede ver la secuencia de la emisión y recepción de las ondas de ultrasonido, con un arreglo de fase.

Figura 14. Diagrama de proceso de un sistema de ultrasonido phased array



Esto se logra mediante un pulso generado por cada uno de los elementos individuales de palpador o transductor, en momentos ligeramente diferentes. El Software conocido como una calculadora de la ley focal, establece tiempos de retardo específicos para la activación de cada grupo de elementos con el fin de generar la forma del haz deseada, teniendo en cuenta características del palpador y la cuña o zapata, así como la geometría y las propiedades acústicas del material de prueba.

La secuencia de pulsos es programada y seleccionada en el software del instrumento y luego trasmite una serie de frentes de onda individuales al material de ensayo. Estos frentes de onda a su vez se combinan constructivamente y destructivamente en un solo frente de onda primaria que viaja a través del material

de ensayo y se refleja en las discontinuidades y límites de materiales, como cualquier onda ultrasónica convencional.

El haz se puede dirigir de forma dinámica a través de diversos ángulos, distancias focales y tamaños de punto focal en una forma tal, que un único conjunto de palpadores es capaz de examinar el material de prueba a través de una gama de diferentes perspectivas. Esta orientación de haz sucede muy rápidamente, de modo que una exploración desde múltiples ángulos o con múltiples profundidades focales se puede realizar en una pequeña fracción de un segundo.

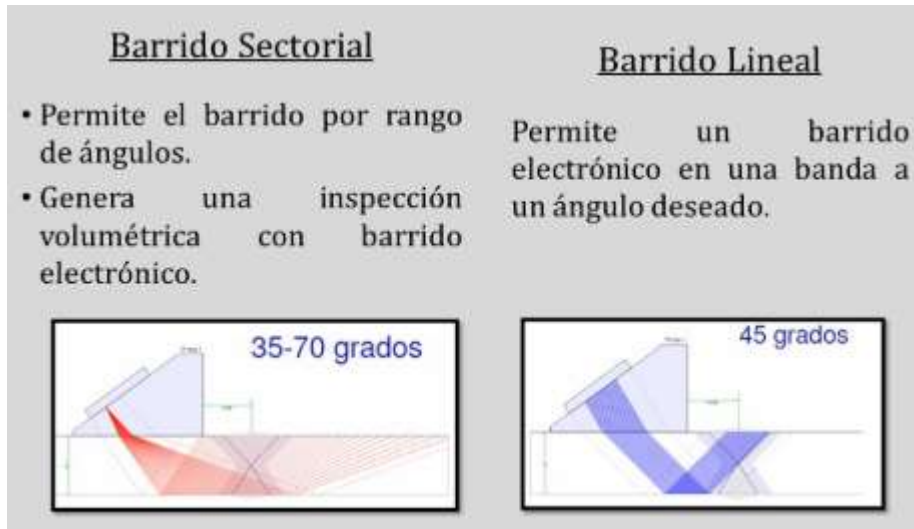
**2.6.2 Ley Focal.** La Ley Focal es la excitación controlada por la computadora (amplitud y retraso) de los elementos individuales en un transductor. La excitación de los elementos puede generar un rayo ultrasónico con la posibilidad de modificar los parámetros del rayo tal como el ángulo y la distancia focal a través de un programa de computadora.

La cantidad óptima de leyes focales es el balance entre la velocidad de rastreo y la resolución de la imagen.

**2.6.2 Barrido Lineal.** Es la excitación de un grupo de elementos activos (apertura o transductor virtual); el escaneo se efectúa con ángulo constante a través de los elementos del transductor, lo cual es equivalente a un transductor ultrasónico convencional ejecutando un mapeo o inspección.

**2.6.3 Barrido Sectorial.** Es la excitación de los elementos de forma individual con un retraso de tiempo, generando diferentes ángulos; para ángulos mayores, el retraso es mayor para los últimos elementos, dado que el haz ultrasónico es generado por los primeros elementos y los ángulos menores por los últimos elementos. (Ver figura 15)

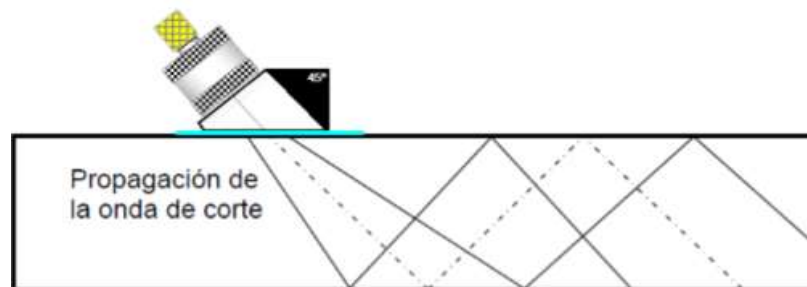
Figura 15. Barrido sectorial y barrido lineal



Fuente: inspección e ingeniería Anzoátegui, C.A.

**2.6.4 Palpador de Haz Angular.** El haz de onda longitudinal emitido por el cristal del palpador se refracta al atravesar la interface, convirtiéndose en un haz de ondas de corte. Tal como se ilustra en la figura 16.

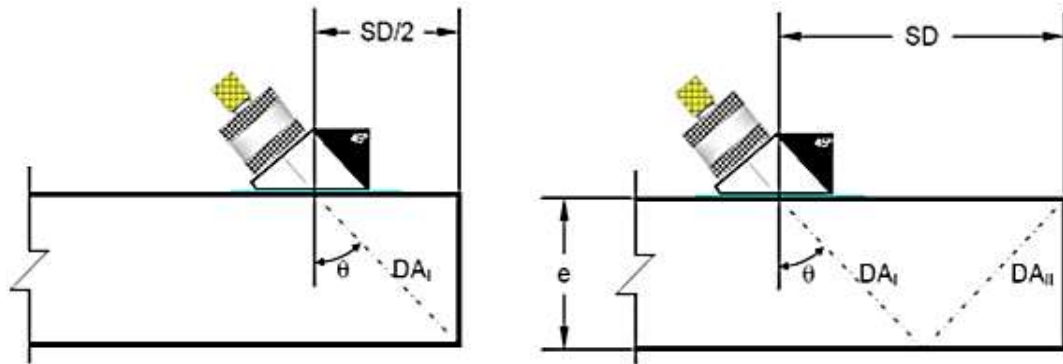
Figura 16. Haz emitido



Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio

La reflexión que da en la esquina inferior del borde de la placa está a una distancia de  $SD/2$  (distancia de medio salto) y la distancia a la que se genera la reflexión en la esquina superior se denomina  $SD$  (distancia de salto), tal como se ilustra en la figura 17.

Figura 17. Distancia de medio salto y un salto



Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio

Se conoce como “primera pierna”, la distancia  $DA_I$ , (ver figura 19), 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. Teniendo en cuenta el ángulo  $\theta$  de cada zapata (en este caso  $36^\circ$ ), y el espesor de la placa, se pueden calcular tanto el salto como el medio salto utilizando la ecuación 2.7.

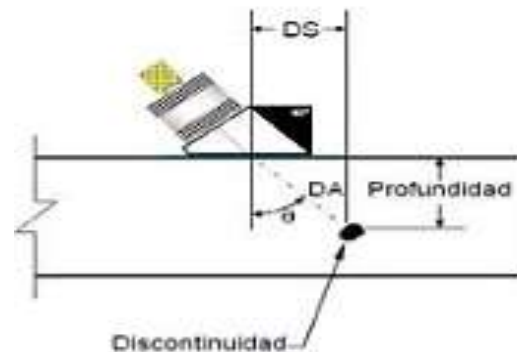
$$\tan \theta = \frac{SD/2}{e} \quad (2.7)$$

Así, despejando se tiene (2.8):

$$\frac{SD}{2} = e \cdot \tan \theta \quad SD = 2 \cdot e \cdot \tan \theta \quad (2.8)$$

**2.6.5 Localización de Discontinuidades.** 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, así mismo, dicha ubicación se puede hallar matemáticamente.

Figura 18. Discontinuidad detectada



Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio

Teniendo en cuenta la figura 18, se plantean las ecuaciones (2.9) y (2.10)

$$\sin \theta = \frac{DS}{DA} \quad (2.9)$$

$$\cos \theta = \frac{PROFUNDIDAD}{DA} \quad (2.10)$$

Despejando se obtiene (2.11) y (2.12)

$$DS = DA \cdot \sin \theta \quad (2.11)$$

$$PROFUNDIDAD = DA \cdot \cos \theta \quad (2.12)$$

Donde:

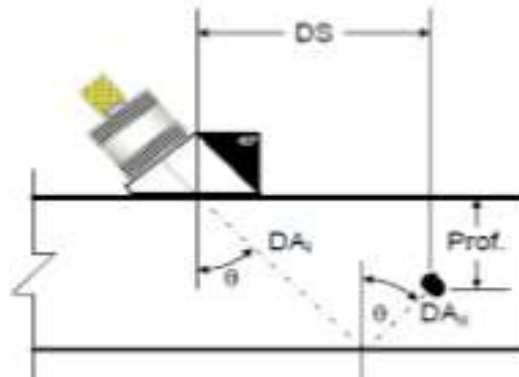
DS: distancia superficial

DA: distancia angular

Theta: ángulo de refracción

Lo anterior si la discontinuidad se encuentra en la primera pierna; si se encuentra en la segunda pierna (figura 19), la distancia angular DA mostrada en la pantalla del equipo es mayor, por lo tanto, matemáticamente queda:

Figura 19. Discontinuidad en segunda pierna



Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio

Con base en las ecuaciones anteriores, se tiene (2.11) y (2.13):

$$DS = DA \cdot \sin \theta \quad (2.11)$$

$$PROFUNDIDAD = 2 \cdot e \cdot (DA_i + DA_{ii}) \cdot \cos \theta \quad (2.13)$$

De (2.11) y (2.13) se obtiene (2.14)

$$PROFUNDIDAD = 2 \cdot e \cdot (DA_i \cdot \cos \theta) \quad (2.14)$$

Donde:

DS: distancia superficial

DA: distancia angular ( $DA_i$ )

$DA_i$ : 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.

## 2.7 PROCESOS DE UNIÓN

En términos generales se entiende por unión o junta, como la fusión de dos o más elementos entre sí, con la finalidad de formar una sola pieza. En la tabla 1 se muestran los procesos de unión.

Tabla 1. Procesos de unión

Uniones fijas	Uniones desmontables	Uniones adhesivas
Remaches Uniones forzadas Soldadura	Tornillo-tuerca Pasadores Chavetas Lengüetas Ejes nervados Guías	Naturales Inorgánicos Sintéticos

**Fuente:** Segura Juan David

A partir del alcance del trabajo de grado, el tipo de unión seleccionado es mediante el proceso de soldadura. Es apropiado hacer una definición del término “soldadura”. De acuerdo con AWS, una soldadura es: “una coalescencia localizada de metales o no metales producida tanto por calentamiento de los metales a la temperatura de soldadura, con o sin la aplicación de presión, o por la aplicación de presión solamente, con o sin el uso de material de aporte.”<sup>7</sup> Coalescencia significa “unidos uno a otro entre sí”. Por esa razón la soldadura se refiere a las operaciones usadas para llevar a cabo en esta operación de unión.

**2.7.1 Proceso de Soldadura.** El proceso de soldadura mediante la acción de unir los elementos por efecto del calor, con o sin aportación de material nuevo, da continuidad a los elementos unidos. Además, la soldadura ha sido tradicionalmente

---

<sup>7</sup> Segura, Juan. (2015). Caracterización morfológica de porosidad en juntas soldadas de tubería de acero ASTM A-36 realizados por procesos SMAW, mediante ensayos no destructivos especializados. (Tesis de pregrado). Universidad Santo Tomas. Bogotá. Colombia.

un producto clave para el desarrollo de nuevos bienes de consumo y creación de infraestructura, asimismo el nivel de calidad con el cual se producen los materiales, son establecidos por la American Welding Society (AWS)<sup>8</sup>.

Se clasifican de la siguiente manera:

- **Soldadura por arco**

La soldadura eléctrica por arco, es el procedimiento por el que se realiza la unión entre dos partes metálicas, aprovechando el calor desarrollado por el arco eléctrico que se libera entre un electrodo (metal de adjunción) y el material por soldar. La alimentación del arco de soldadura se puede obtener con una máquina generadora de corriente alterna (soldadora).

- **Soldadura por resistencia**

El proceso de soldadura por resistencia, consiste en la fusión de elementos mediante la combinación de calor y presión para obtener la coalescencia, el calor se genera mediante una resistencia eléctrica dirigida hacia el flujo de corriente en la unión que se va a soldar, de esta manera la soldadura por resistencia no tiene necesidad de utilizar gases protectores, fundentes o metales de relleno. Este tipo de proceso de fusión por que el calor aplicado provoca la fusión de las superficies de empalme.<sup>9</sup>

- **Soldadura blanda**

El proceso de soldadura blanda (Soldering) es considerado cuando el material de aporte se funde a una temperatura menor a los 450 °c y también el punto de fusión el material base debe estar por debajo también del punto de fusión del metal base.

---

<sup>8</sup> Ibid.

<sup>9</sup> Romero, Bernardo. Proboste, Felipe. Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura. (Tesis de pregrado). Universidad del Bio Bio. Chile.

- **Soldadura Fuerte**

La soldadura fuerte (brazing) es el proceso de unión de dos piezas mediante calor y un material de aportación que se funde a una temperatura por encima de los 450° C (800 °F) y por debajo del punto de fusión de las piezas a ser soldadas. El material de aportación utilizado en soldadura fuerte varía en función del material de las piezas a unir. Las aleaciones que más se utilizan son de cobre fosforoso, plata, níquel y cobalto, aluminio-silíceo, cobre, cobre-zinc y magnesio.<sup>10</sup>

- **Soldadura en estado sólido**

Los procesos de soldadura en estado sólido usan presión o una combinación de calor y presión. Si se usa calor la temperatura del proceso está por debajo del punto de fusión de los metales que se van a soldar. Generalmente no se utilizan un metal de aporte en estos procesos.

- **Soldadura con oxígeno y gas combustible**

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.

**2.7.2 Determinación de los Defectos en el Proceso de Soldadura.** Para llegar a tener un criterio adecuado con respecto a las variables e indicaciones que se presentan en un proceso SMAW, hay que tener en cuenta un conocimiento adecuado en defectología y poder lograr diferenciar entre una discontinuidad y

---

<sup>10</sup> Ibid.

defecto. Ya que en las inspecciones de END (Ensayos No Destructivos) toda indicación presente en la soldadura es interpretada por el inspector y es la persona calificada para determinar si es un defecto o no.

### **Indicación**

1. Una indicación falsa es aquella que aparece durante la inspección y puede ser provocada por una mala aplicación del método.
2. 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 afecta el desempeño de la pieza.
3. Una indicación relevante es aquella que por su ubicación, forma, tamaño o cantidad afecta el desempeño de la pieza.

### **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, pero hay que tener en cuenta las siguientes argumentaciones ya que en los ensayos no destructivos son primordiales al cual tiene que tener en cuenta a la hora de una aceptación.

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

### **Discontinuidad**

Por discontinuidad se puede hablar o interpretar cualquier interrupción presente en la estructura física o configuración de la pieza.

De tal manera las discontinuidades se clasifican en 3 partes:

- Inherentes: generadas durante la producción inicial del estado de fundición.

- De proceso: causadas por procesos posteriores al estado de fundición, como la forja, extrusión, soldadura, tratamientos térmicos.
- De servicio: las cuales surgen debido del producto final por condiciones de carga o ambientales.

Profundizando en las discontinuidades, estas pueden agruparse de la siguiente manera. Ver tabla 2.

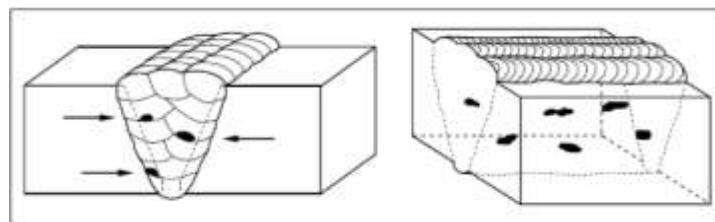
Tabla 1. Discontinuidades externas e internas

DISCONTINUIDADES			
EXTERNAS		INTERNAS	
GRIETAS		GRIETAS	
Longitudinales	Penetración incompleta	Longitudinales	Penetración incompleta
Transversales	Descolgamientos	Transversales	Falta de fusión
Cráter	Desalineamientos		Escoria
			Porosidad

Al realizar la inspección, se debe centrar en las discontinuidades internas del material, teniendo en cuenta que las discontinuidades externas pueden causar confusión y mala interpretación de los datos. Dentro de las discontinuidades internas más comunes se tiene:

2.7.2.1 Inclusión de escoria. Son inclusiones los residuos originados por materiales solidos extraños atrapados en la masa del metal durante el proceso de soldadura. Tal como se muestra en la figura 20.

Figura 20. Inclusión de escoria



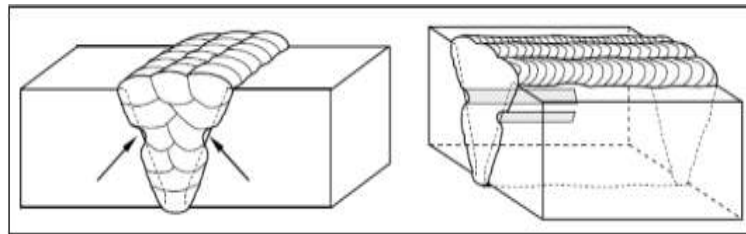
Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio.

2.7.2.2 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 ver figura 21:

- 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 1. Fusión incompleta



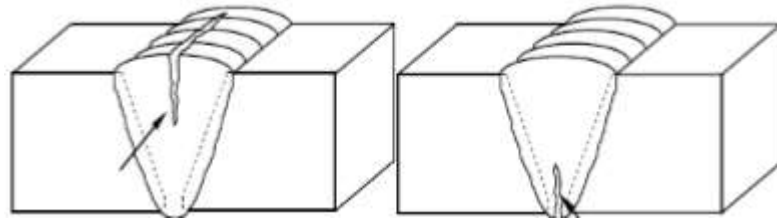
Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio.

2.7.2.3 Grietas. En la soldadura, las grietas son las discontinuidades más críticas; 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. Las grietas pueden clasificarse en diferentes formas, dependiendo de su perspectiva, tal como se describe en las tablas 3 y 4.

Tabla 2. Clasificación de grietas en soldadura

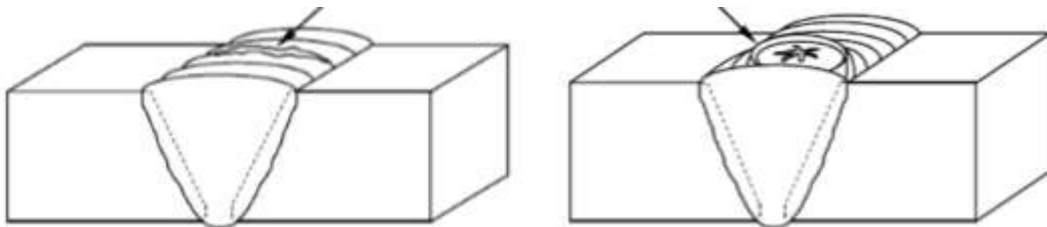
Consideración	Por la forma de indicar cuando ocurren	Por la forma de describir su dirección	Por la localización exacta respecto a las partes de la soldadura
Tipos de grietas	*Grietas frías	*Grietas longitudinales	* De garganta
	*Grietas calientes	*Grietas transversales	* De raíz
		Ver figura 22 y 23	* De dedo
			* De cráter
			* De cordón
			* De metal base

Figura 22. Grietas longitudinales



Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio

Figura 23. Grieta transversal y cráter



Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio

Tabla 3. Grietas y sus características

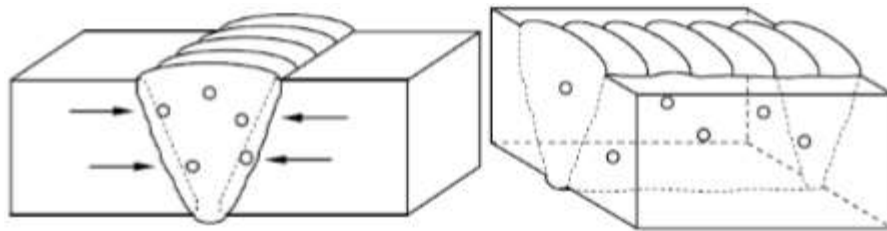
Tipo de grietas	Morfología	Origen
Grietas frías	Grietas ocurre en granos individuales	Durante la solidificación del metal a altas temperaturas
Grietas calientes	Grietas intergranulares	Después que el metal se ha solidificado y enfriado a T° ambiente
Grietas longitudinales	Grietas paralelas al eje de la soldadura	Resultan de esfuerzos transversales de contracción o esfuerzos asociados a condiciones de servicio
Grietas garganta	También son grietas longitudinales	Como continuación de grietas internas, se extienden a lo largo de la garganta de la soldadura
Grietas de dedo	Grietas alargadas	Se propagan desde los dedos de la soldadura, la configuración de la soldadura y una baja ductilidad más el calor incrementa susceptibilidad a este tipo de defecto
Grietas de cordón	Grietas longitudinales paralelas al eje del cordón	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 de raíz	Son grietas longitudinales	Debido a juntas inadecuadas, como aberturas de raíz; estas provocan concentraciones de esfuerzos
Grietas de cráter	Grietas con arreglo radial	Por un llenado incompleto del charco de soldadura fundida al terminar el arco; combinado a esfuerzos de concentración

		durante la solidificación dan origen a cráter o redes de grietas
Grietas en el metal base	Grietas longitudinales o transversales	Asociados con elevadores de esfuerzos, los cuales resultan en el agrietamiento una vez que la pieza ha sido puesta en servicio

Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio

2.7.2.4 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 24.

Figura 24. Porosidad con discontinuación uniforme



Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio

**2.7.3 Normas Aplicadas al Proceso de Soldadura.** La inspección de un componente que sea crítico o este regulado dentro de la industria puede estar cubierta por múltiples documentos como códigos, normas, procedimientos y especificaciones.

Existen documentos que la industria pregona en la práctica cotidiana con respecto a procedimientos de inspección por ultrasonido junto a criterios de aceptación y rechazo aplicados a proceso de soldadura:

- El Artículo 4 de la Sección V del Código ASME para Recipientes a Presión y Calderas, Métodos de Inspección Ultrasónica para Soldaduras, Edición 2007, Julio de 2007.
- El Código AWS para Estructuras Soldadas de Acero, ANSI / AWS D1.1, Cláusula 6 – Inspección, Parte F – Inspección por Ultrasonido (UT) de Soldaduras de Ranura.
- Procedimiento para la Inspección Ultrasónica de Placas de Acero, Procedimiento No. LLOG-UT-005.

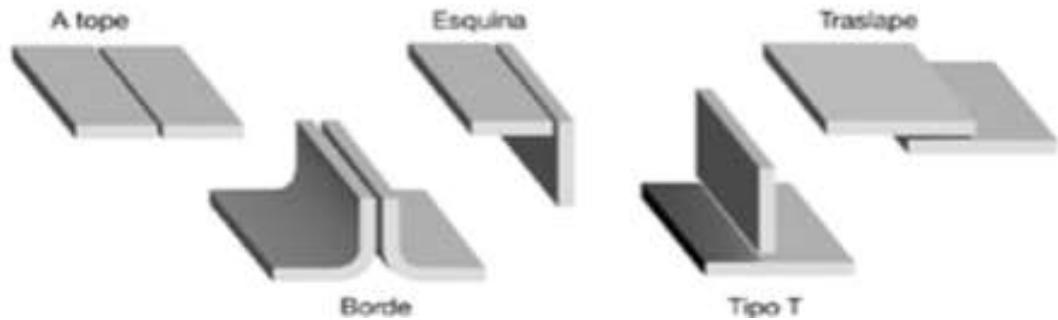
Los criterios de aceptación y rechazo están a continuación:

- El Código ASME para Recipientes a Presión y Calderas, Sección VIII, División 1, Apéndice 12, Inspección Ultrasónica de Soldaduras (UT).
- El Código AWS para Estructuras Soldadas de Acero, ANSI / AWS D1.1, Cláusula 6 – Inspección, Parte C – Criterios de Aceptación, 6.13 Inspección por Ultrasonido.
- 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.

#### **2.7.4 Aspectos a Considerar para la Inspección**

2.7.4.1 Juntas. Es importante conocer la preparación de la junta, forma y perfil para realizar la inspección, en la figura 25 se muestran las juntas básicas aplicadas en la industria.

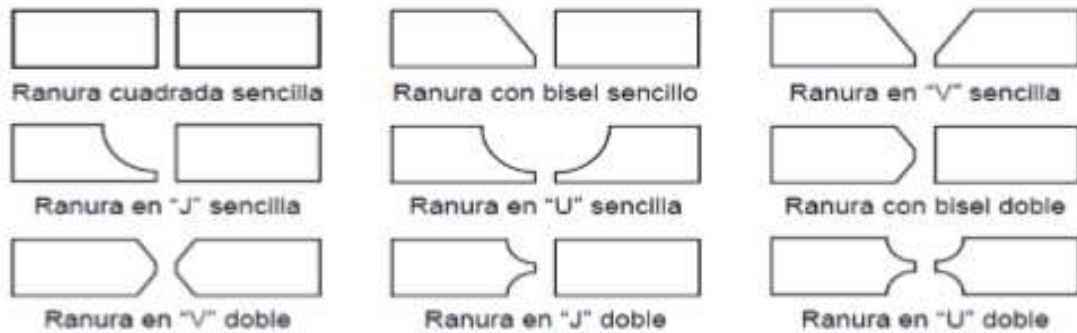
Figura 25. Juntas comunes en soldadura



Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio

2.7.4.2 Tipos de ranura. Durante la inspección, conocer el tipo de ranura puede ayudar a determinar el tipo y localización de las discontinuidades en soldadura. En la figura 26, se muestran diferentes tipos de ensambles con diferentes tipos de ranuras.

Figura 26. Tipos de ranura



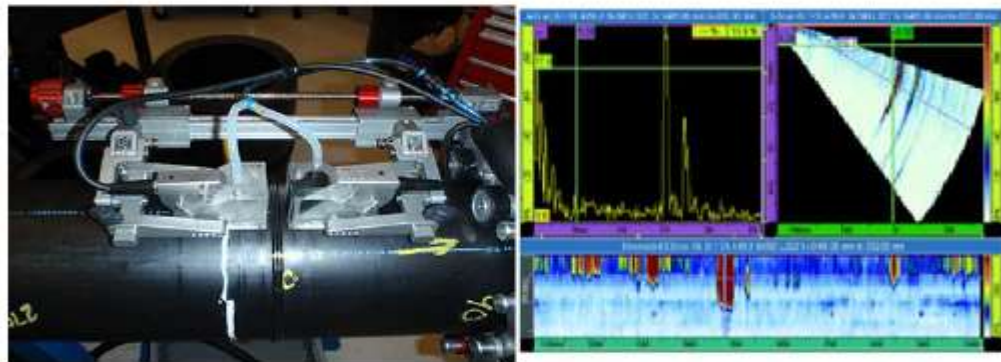
Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio

De esta manera encontramos en la siguiente tabla las imperfecciones o irregularidades que se presentan en el cordón de soldadura o en las zonas afectadas por el calor. Lo consideramos como defecto cuando su tamaño o localización pueden provocar un fallo de la unión.

## 2.8 APLICACIÓN DE LA TECNICA

Los Sistemas de ultrasonidos *Phased Array* potencialmente se pueden emplear en casi cualquier prueba en la que tradicionalmente se han utilizado detectores de defectos por ultrasonidos convencionales. La inspección de soldaduras y detección de fisuras son las aplicaciones más importantes, y estas pruebas se realizan a través de una amplia gama de industrias, incluyendo la aeroespacial, generación de energía, petroquímica, estructuras metálicas y proveedores de bienes tubulares, construcción y mantenimiento de tuberías y fabricación general. En la Figura 27, se muestra una imagen típica de una inspección de soldadura por *Phased Array*.

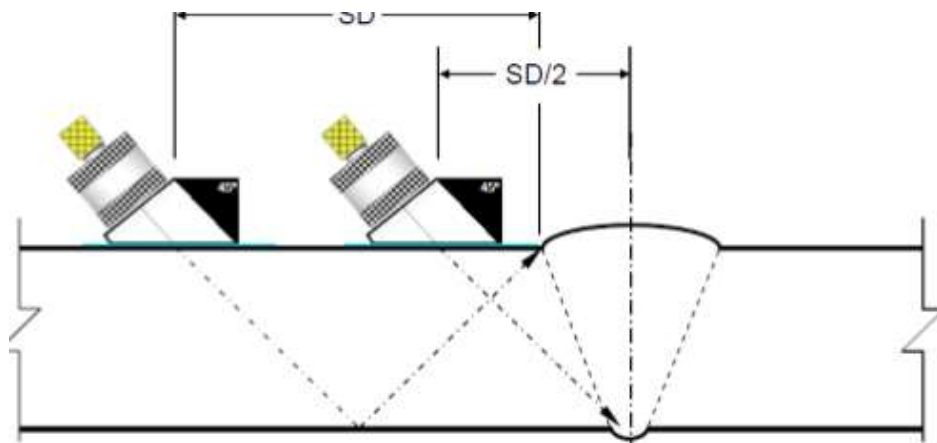
Figura 27. Registro de una inspección de soldadura por phased array



Fuente: Olympus-ims 2011

**2.8.1 Inspección en Soldadura.** Cuando se hace una inspección en soldadura utilizando ultrasonido, es necesario hacer un barrido de la sección transversal del cordón, para ello se tiene un rango de desplazamiento de la zapata que esta entre el medio salto y un salto. El medio salto incide en la raíz del cordón, mientras que el salto incide en la parte superior del cordón, tal como se ilustra en la figura 28.

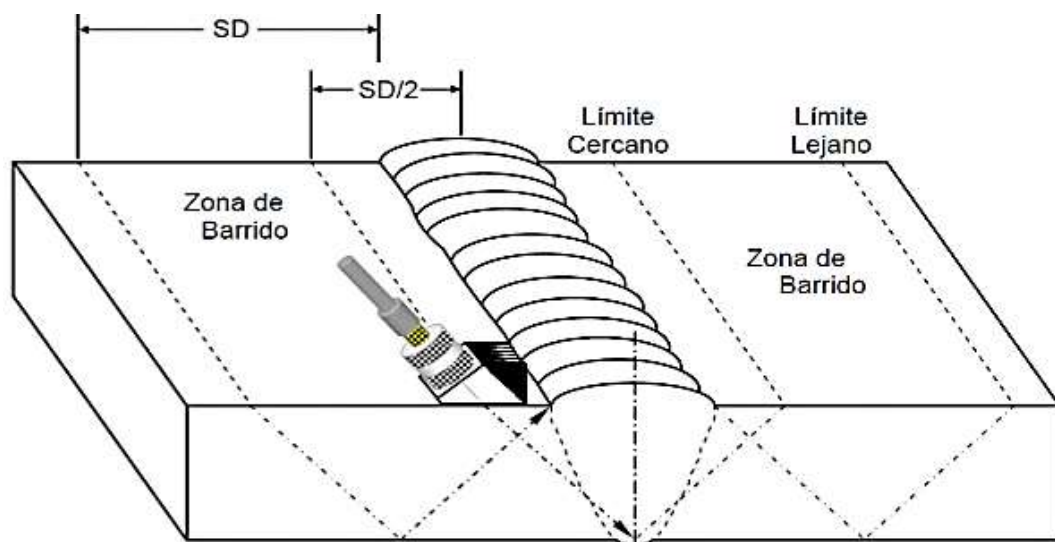
Figura 28. Salto y medio salto



Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio

**2.8.2 Zona de Barrido.** Para realizar la inspección de una soldadura es importante realizar un barrido confiable estableciendo un área o límites de barrido; la cual va desde la línea central de la soldadura hasta las distancias de medio y un salto tal como se muestra en la figura 29. Este es el espacio recomendado para realizar los movimientos de la zapata.

Figura 29. Zona de barrido

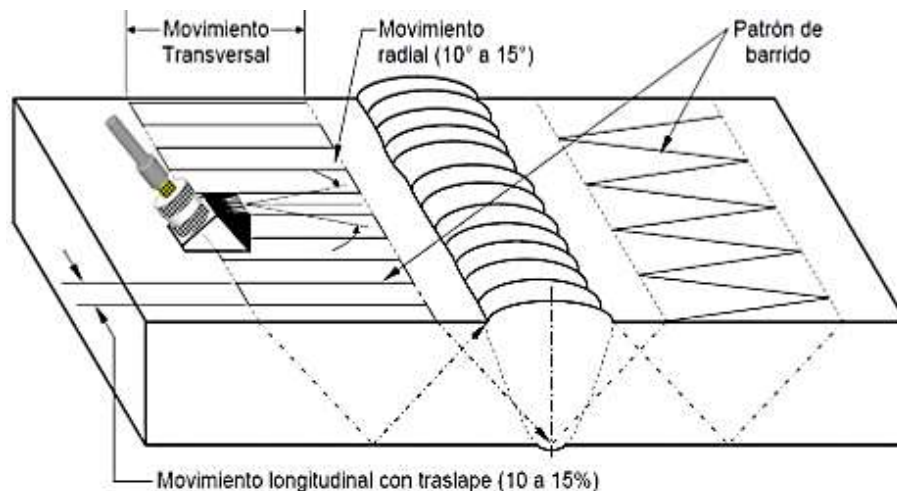


Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio

**Patrón de barrido:** teniendo en cuenta que el barrido debe efectuarse en la “zona de barrido”; para la detección de discontinuidades longitudinales, la zapata debe estar perpendicular al eje de la soldadura y moviéndose sobre la zona de barrido, ver figura 31<sup>11</sup>.

- **Movimiento longitudinal:** es necesario realizar movimientos paralelos al eje de la soldadura, el avance de la zapata no debe exceder el 75% del ancho de la misma.
- **Movimiento radial:** para las discontinuidades no paralelas al eje de la soldadura, los movimientos longitudinales y transversales del palpador deben ir combinados con movimientos radiales, oscilando estos entre los 10° y 15° a cada lado de la línea central de la zapata tal como se muestra en la figura 30. Estos movimientos deben ir combinados para tener mayor seguridad en la detección de imperfecciones en cualquier orientación.

Figura 30. Movimientos del palpador en la zona de barrido



Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio

**Evaluación de discontinuidades.** A continuación, factores que afectan la evaluación de una discontinuidad:

<sup>11</sup> Romero, Bernardo. Proboste, Felipe. Aplicación del ultrasonido al control de calidad de procesos de soldadura. (Tesis de pregrado). Universidad del Bio Bio. Chile.

- ✓ Capacidad en la calibración
- ✓ Capacidad de resolución
- ✓ Condición superficial
- ✓ Exactitud con el ángulo de refracción
- ✓ Pérdida de senilidad
- ✓ Divergencia del haz ultrasónico
- ✓ Característica de la discontinuidad
- ✓ Experiencia del técnico

**Determinación de las características de una discontinuidad:**

- Localización: con la correcta calibración de equipo, esta entrega la localización exacta de la discontinuidad o, también se puede calcular matemáticamente.
- Tamaño: la amplitud de la señal de una discontinuidad se usa como medición de su tamaño. Estas deben ser evaluadas teniendo en cuenta la experiencia con discontinuidades reales, ya que los reflectores artificiales no relacionan formas y tamaños de discontinuidades reales.

Al determinar la localización, las discontinuidades pueden clasificarse como pequeñas (cuando su área es más pequeña que la sección transversal del haz ultrasónico) y grandes (cuando su área es más grande que la sección transversal del haz ultrasónico) así, el tamaño de una discontinuidad puede determinarse por dos métodos:

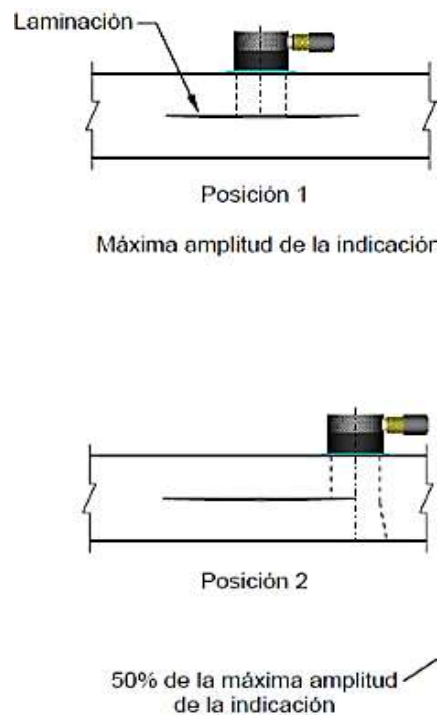
- Para discontinuidades pequeñas, método por comparación con reflectores de referencia

Este método consiste en utilizar el patrón de calibración (en este caso el V1) para calibrar tanto el palpador como la zapata en sensibilidad y posteriormente compara las amplitudes de la discontinuidad detectada con la hallada en el patrón de calibración. A su vez, para determinar la longitud de la discontinuidad se aplica la técnica de la caída de los 6 dB que consiste en:

Al detectar la máxima amplitud de la indicación de una discontinuidad, se desplaza el palpador en la dirección de la discontinuidad hasta que esta amplitud descienda al 50%, esto equivale a -6 dB, tal como se ilustra en la figura 31.

La esencia de esta técnica es asumir que al detectar la caída de la máxima amplitud al 50%, este será el borde de dicha discontinuidad. Después de detectar los dos bordes, se puede determinar directamente la longitud de la discontinuidad.<sup>12</sup>

Figura 31. Técnica de los 6 dB



Fuente: Aplicación de ultrasonido, Universidad de Bio Bio

- Para discontinuidades grandes, método por caída de amplitud  
Se utiliza la misma técnica de la caída de los 6 dB, pero al ser una discontinuidad grande, esta técnica dibuja el contorno de la discontinuidad.

<sup>12</sup> Gómez, Eduardo. Ultrasonidos nivel II. Ensayos no destructivos. pp 105.

**2.8.3 Formas de Representación de Datos.** Durante o al finalizar la inspección hay varias formas de representar los datos obtenidos. A continuación, se describe cada uno de ellos:

- **Tipo A-scan:** en los ensayos no destructivos, este tipo de representación es la más utilizada; proporciona información acerca del espesor del material inspeccionado, la profundidad a la cual se encuentra una discontinuidad, y el tamaño relativo de la misma.
- **Tipo B-scan:** proporciona una vista de la sección transversal tanto de la pieza inspeccionada como de las discontinuidades detectadas. Es usada principalmente con el fin de efectuar monitoreo de corrosión en calderas, intercambiadores de calor y tuberías.
- **Tipo C-scan:** proporciona una vista de planta de la pieza inspeccionada y de las discontinuidades detectadas, en un registrador XY, o en un sistema de adquisición de datos computarizado. Esta técnica es poco utilizada en campo.
- **Tipo S-scan:** es un barrido sectorial en una vista de dos dimensiones; enlaza las características de un palpador de arreglo de fase (recorrido del ultrasonido, ángulo refractado, índice y la distancia proyectada al reflector) con la profundidad de la pieza inspeccionada. La vista de dos dimensiones representa el rango de barrido, un sector circular.

### 3. METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DEL PALPADOR Y LA ZAPATA EN EL EQUIPO OMNISCAN MX2

Procedimiento básico para la calibración del palpador y zapata utilizando el equipo omniscan mx2 de Olympus, ver figura 34.

Figura 32. Equipo Omniscan mx2



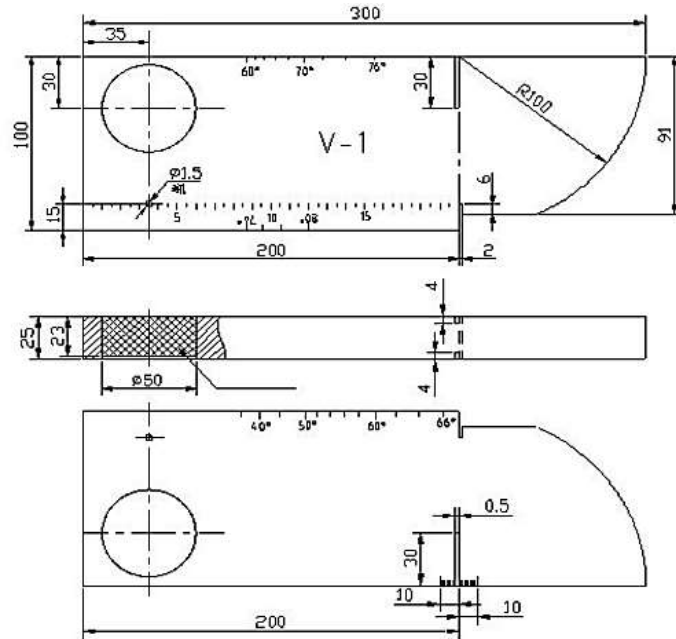
#### 3.1 PROBETA DE CALIBRACIÓN V1

Aplicando la norma de patrones para ensayos no destructivos con ultrasonido DIN 54120, se tiene el patrón de calibración V1 con su respectivo plano. Ver figura 33 y 34.

Figura 33. Probeta de calibración V1



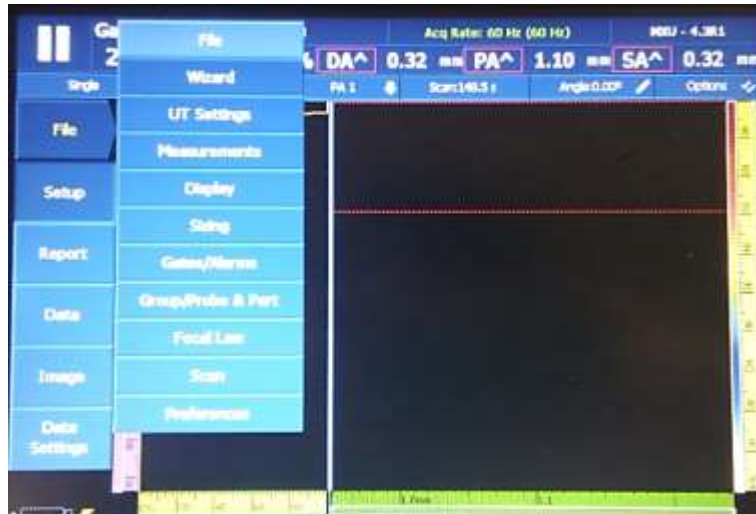
Figura 34. Plano de Probeta de calibración V1



Fuente: Global supply logistic

Para llevar a cabo la calibración tanto del palpador como de la zapata, se procede a seleccionar la memoria del omniscan para acceder al menú principal. Ver figura 35.

Figura 35. Menú principal equipo Omniscan mx2

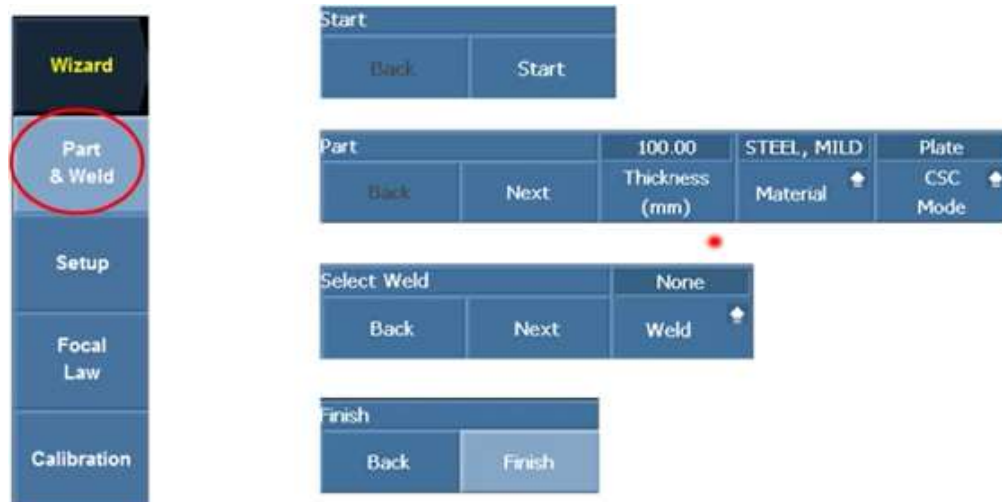


A continuación, en la opción file se selecciona la opción de nuevo (new), para empezar una calibración nueva. Ver figura 35.

Para continuar con la calibración seleccionamos la opción wizard en el menú principal. En ella encontramos la calibración de la pieza que vamos a inspeccionar, la geometría de la soldadura, la zapata y el palpador.

### 3.2 CONFIGURACIÓN DE LA PIEZA Y LA SOLDADURA

Figura 36. Menús de la opción pieza y soldadura



En la figura 36, se muestran todos los sub-menús disponibles en la configuración tanto de la pieza como de la soldadura. Se debe tener en cuenta el orden de configuración presente en la figura; si la configuración de la pieza no se ha efectuado completamente no se puede acceder a la configuración de la soldadura.

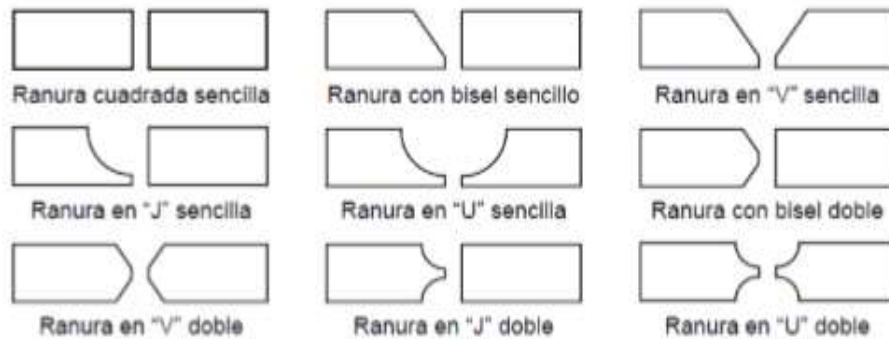
**3.2.1 Configuración de la Pieza.** En la figura 38, se observa en el submenú “part” tres opciones:

- **Thickness (espesor):** esta opción permite dar el espesor de la pieza a inspeccionar.

- **Material:** permite seleccionar el material de la pieza que se va a inspeccionar; en esta opción cada material viene con la configuración base de la velocidad del sonido en él.
- **Mode CSC:** en este menú se encuentran tres opciones, "Plate" si la pieza a inspeccionar es plana, OD si la pieza es curva y la inspección se va a realizar en la parte externa de la curvatura o ID si se va a realizar en la parte interna de la soldadura.

**3.2.2 Configuración de la Soldadura.** En la opción soldadura (Weld), se encuentran las siguientes opciones, tal como se aprecia en la figura 37:

Figura 37. Opciones de soldadura del omniscan

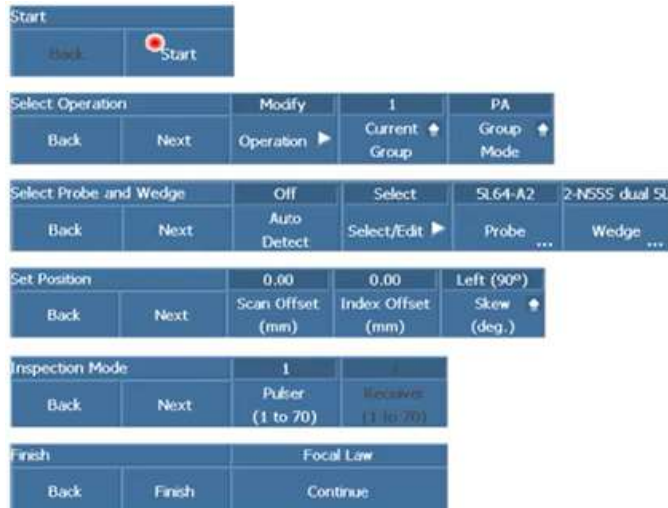


Aquí se debe escoger el tipo de soldadura que se va a inspeccionar, se debe tener previo conocimiento del tipo y geometría de la misma. Si no se tiene el previo conocimiento de la soldadura, se escoge la opción V compensado, la cual durante la inspección ayuda a corregir la geometría de la misma. Por último, selecciona termina para acceder a la configuración del palpador a la zapata.

### 3.3 CONFIGURACIÓN DEL PALPADOR Y LA ZAPATA

Se selecciona la opción "setup" y se muestran los sub menús de la figura 38:

Figura 38. Menú calibración palpador y zapata



- **Select operation:** en este sub menú se selecciona que tipo de ultrasonido se va a utilizar, dado que el omniscan mx2 tiene la opción de ultrasonido convencional y ultrasonido phased array. Se selecciona el phased array “PA”.
- **Select Probe and wedge:**

Figura 39. Palpador A2



Figura 40. Zapata N55S



Para configurar el palpador (figura 39) vamos a la opción Probe, seleccionamos la opción 5L64 A12, ya que este es un palpador de Olympus; si el palpador utilizado para la inspección no es de Olympus, se configura con la ficha técnica que le provee el fabricante.

Para configurar la zapata “wedge” (figura40), se selecciona la referencia que viene marcada en ella si esta es de Olympus, de lo contrario, si es especial, se deben ingresar los datos de la ficha técnica del fabricante. Por último, se selecciona terminar.

### 3.4 CONFIGURACIÓN DE LA LEY FOCAL

- **Select law configuration:** se selecciona el barrido sectorial (figura 41), ya que este me permite una mayor cobertura de la soldadura al realizar la inspección.
- **Set wave type:** en esta opción hay dos tipos: la longitudinal y la de corte. En este caso se selecciona la de corte debido a que la longitudinal genera una inspección superficial.
- **Select probe elements:** la zapata consta de 49 elementos, de los cuales son emitidas las ondas, se puede escoger cualquiera de los 49 elemento dependiendo de la comodidad para realizar la inspección.
- **Set beam Angle:** entre que ángulos se va a realizar el barrido, se recomienda un barrido entre los 35° y los 75° para inspecciones de soldadura, si se toman menor a 35° las ondas se convierten en longitudinales y si se toman mayor a 75° se vuelven superficiales. Se recomienda 45° y 70°.
- **Focus Depth:** es la profundidad a la cual se tiene una buena resolución, para el caso del palpador A2 se tiene una profundidad máxima de 150 mm. Para finalizar se selecciona generar.

Figura 41. Configuración ley focal

Focal Law					
Back		Start			
Select Law Configuration		Sectorial		2	
Back		Next		Law Config.	
Set Wave Type		Sectorial		Custom	
Back		Next		Wave Type	
Select Probe Elements		20		40	
Back		Next		Element Qty.	
Set Beam Angle		45.00		70.00	
Back		Next		1.00	
		Min. Angle (deg)		Max. Angle (deg)	
				Angle Step (deg)	
				Focus Depth (mm)	
Set gate A		89.35		20.00	
Back		Next		Start (mm)	
				Width (mm)	
Generate Law					
Back		Generate			

22

### 3.5 CALIBRACIÓN DE VELOCIDAD, SENSIBILIDAD Y RETARDO

Para calibrar la velocidad del material, el retardo y la sensibilidad de la zapata se requiere un patrón de calibración V1, los cuales se muestran en la figura 42.

Figura 42. Patrones de calibración V1



**3.5.1 Velocidad del Material.** Si la velocidad del sonido es conocida se puede ingresar manualmente, de lo contrario se procede a calibrar mediante el software. Ver figura 43.

Figura 43. Menú de calibración de la velocidad del material



Para calibrar la velocidad del material además del patrón V1 se requiere de un gel conductor de ultrasonido. En la calibración de la velocidad el omniscan tiene un margen de error de  $\pm 20$  m/seg. Velocidad base de los aceros 5890 m/seg.

El asistente de calibración de velocidad del MX2 dispone de tres opciones para medir la velocidad de una pieza compatible tanto con ondas longitudinales como transversales:

- **Radio:** recorrido del sonido del haz sobre un radio
- **Profundidad:** haz sobre un taladro lateral
- **Espesor:** cero grados, eco de fondo sobre la pieza

Para este caso se toma la opción de radio debido a que tiene menos margen de error al hallar la velocidad del material. Se procede de la siguiente manera:

Se selecciona la opción de medida, hay 3 opciones (figura 44):

- A. Primer punto de corte
- B. Primer pico
- C. Pico máximo

Figura 44. Opciones de selección de medida

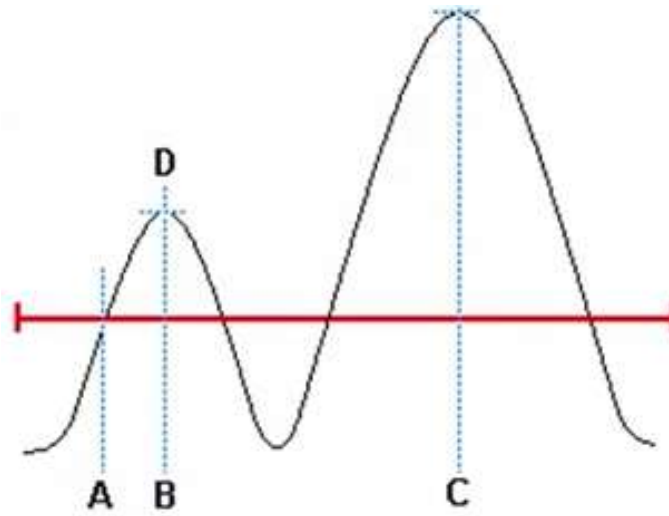
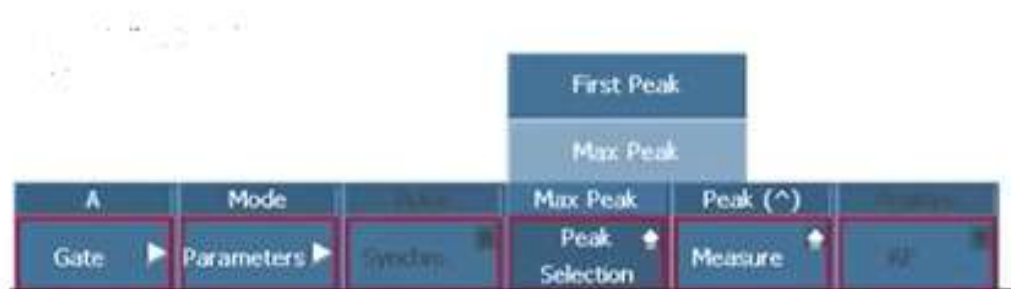


Figura 45. Opciones de medida en el MX2



Hay que tener en cuenta que la opción seleccionada (figura 45) debe ser la misma para todas las siguientes calibraciones.

### 3.5.1.1 Posición de la zapata en la probeta

Figura 46. Calibración de velocidad



Se debe introducir los valores de los radios de referencia del patrón V1, los cuales son 25 mm y 28 mm, ver figura 47.

Figura 47. Radios de la probeta



Ahora se debe posicionar la puerta de referencia, la cual va a ser cortada por la onda, ver figura 48.

Figura 48. Posicionamiento de la puerta



Luego se toman los puntos de referencia, teniendo en cuenta la opción de medida seleccionada en la figura 45.

Se toman las referencias de los radios de 25 (figura 49) y 28 (figura 50) mm de la siguiente manera:

Figura 49. Toma de referencia del radio de 25mm

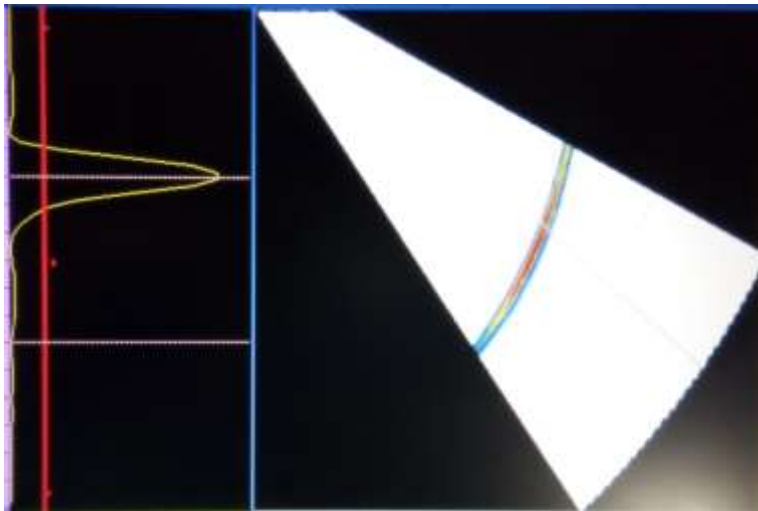
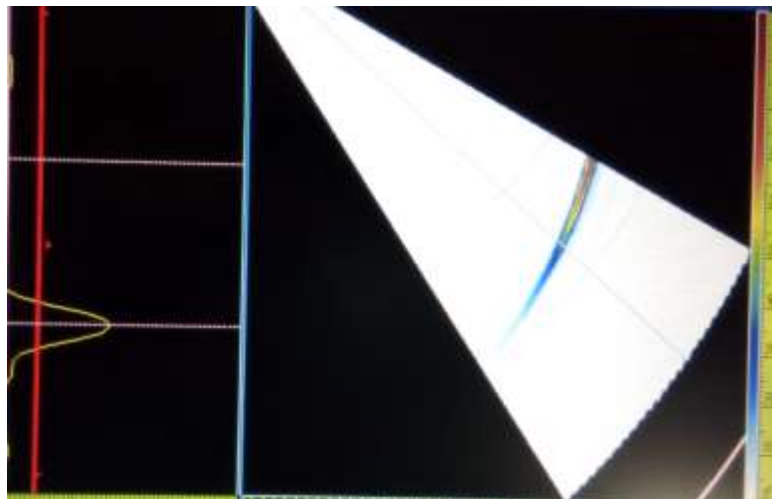
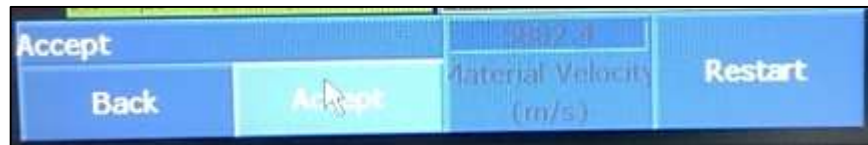


Figura 50. Toma de referencia del radio de 28 mm



Se obtiene la velocidad (ver figura 51) mediante el software del omniscan. Si la onda no se percibe de forma clara para tomar su pico máximo, se le aumenta la intensidad de la onda (db) para suavizar el pico máximo.

Figura 51. Velocidad del sonido en el material



**3.6.1 Retardo de la Zapata.** El asistente de calibración de retardo de la zapata está diseñado para medir y desplazar la propagación del sonido entre el palpador y el punto de salida de la ley focal en la zapata.

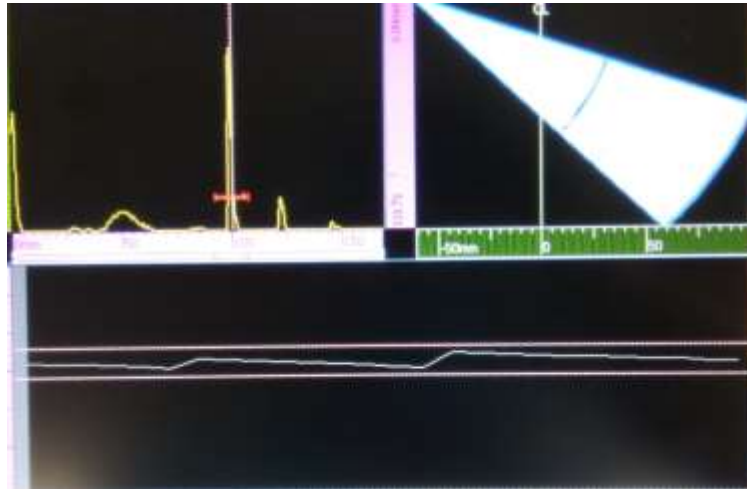
Figura 52. Ubicación del palpador para el retardo de la zapata



En el retardo de la zapata se toma como referencia el radio mayor que es de 100.5 mm. Ver figura 52.

Para corroborar que el retardo de la zapata fue realizado de manera correcta, la línea blanca de la pantalla inferior debe estar entre el rango predeterminado como se ilustra en la figura 53:

Figura 53. Calibración del retardo de zapata



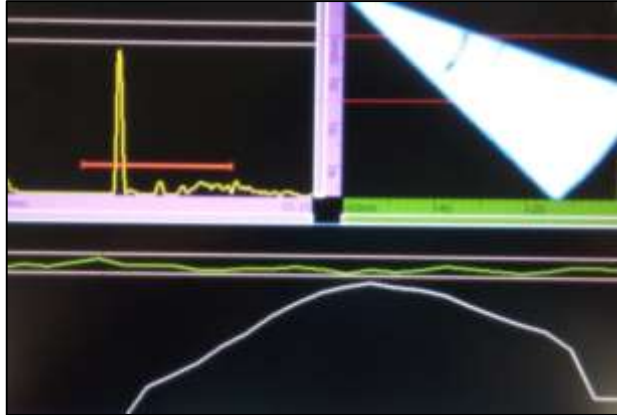
**3.6.2 Sensibilidad de la Zapata.** El asistente de calibración en sensibilidad está diseñado para igualar la amplitud de todas las leyes focales del grupo sobre el reflecto, entalla o taladro lateral del bloque de referencia. Ver figura 54.

Figura 54. Calibración sensibilidad de la Zapata



De igual manera que en el retardo de zapata, la línea verde de la pantalla inferior debe quedar dentro del rango establecido, tal como se aprecia en la figura 55.

Figura 55. Calibración de sensibilidad de la zapata



De esta manera se calibran tanto la zapata como el palpador de manera correcta, ahora se puede proceder a realizar las inspecciones pertinentes.

#### **4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN LA DETECCIÓN DE FALLAS EN SOLDADURAS DE LOS ACEROS 1018, 1020,1045.**

Para realizar las pruebas en las soldaduras ya mencionadas se emplearon los elementos de la figura 56:

Figura 56. Elementos para las pruebas con soldadura



Teniendo en cuenta la metodología mencionada en el numeral 3, se procede a configurar el equipo para el escaneo y a preparar las placas para la inspección.

##### **4.1 CONFIGURACIÓN DE LA ZAPATA PARA LA LECTURA DE LA SOLDADURA**

A continuación, en las tablas 5,6 y 7, se muestran los distintos valores de ganancia para la calibración de cada uno de los aceros usados en la inspección.

Tabla 4. Ganancia en dB para la calibración del acero 1018

<b>ACERO 1018 vel 5940,6 m/s</b>			
	<b>VELOCIDAD</b>	<b>RETARDO ZAPATA</b>	<b>SENCIBILIDAD</b>
<b>ANGULO</b>	<b>GANANCIA db</b>	<b>GANANCIA db</b>	<b>GANANCIA db</b>
45°	48	28	37-39
50°	45	45	42
55°	45	45	40
60°	45	45	38
65°	45	40	40
70°	40	40	40

Tabla 5. Ganancia en dB para la calibración del acero 1045

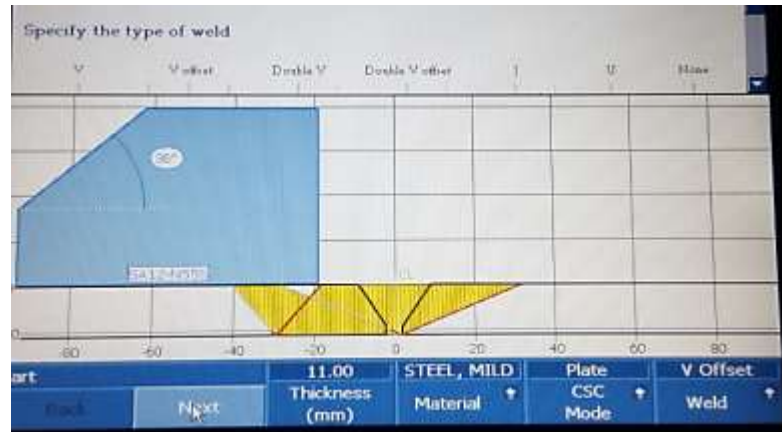
<b>ACERO 1045 vel 5825,2</b>			
	<b>VELOCIDAD</b>	<b>RETARDO ZAPATA</b>	<b>SENCIBILIDAD</b>
<b>ANGULO</b>	<b>GANANCIA db</b>	<b>GANANCIA db</b>	<b>GANANCIA db</b>
45	42	35	34
50	40	35	33
55	42	32	34
60	42	35	33
65	40	30	34
70	40	40	34

Tabla 6. Ganancia en dB para la calibración del acero 1020

<b>ACERO 1020 vel 5882,4</b>			
	<b>VELOCIDAD</b>	<b>RETARDO ZAPATA</b>	<b>SENCIBILIDAD</b>
<b>ANGULO</b>	<b>GANANCIA db</b>	<b>GANANCIA db</b>	<b>GANANCIA db</b>
45	35	35	34
50	35	35	34
55	35	35	35
60	35	35	38
65	35	35	38
70	35	35	40

Luego de realizar la calibración tanto en retardo como en sensibilidad de la zapata, se procede a calibrar la zapata especificando la geometría de la soldadura, el espesor de la placa, además de la posición de elemento a la cual se siente cómodo el técnico, ver figura 57.

Figura 57. Configuración de la geometría de la soldadura



Al culminar este paso se procede a realizar el escáner, se debe tener suficiente gel conductor debido a la fácil absorción por la placa y cambio de estado gel a líquido, tal como se aprecia en la figura 58.

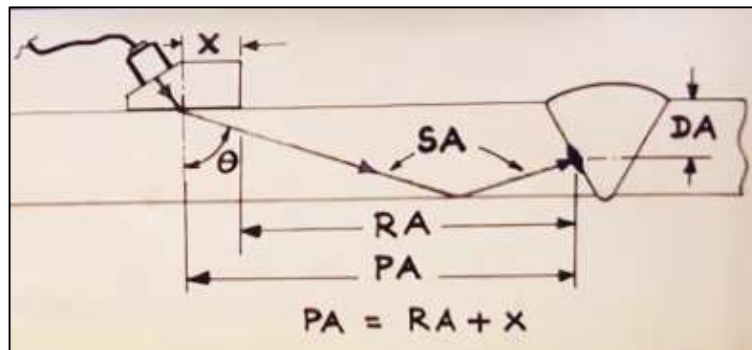
Figura 58. Inspección de fallos en soldadura



Al desplazar suavemente la zapata por la placa, en la pantalla del omniscan se van reflejando las posibles imperfecciones que hay en dicha soldadura.

**4.1.1 Lectura de la Simbología de la Pantalla del Omniscan.** Al realizar la respectiva inspección se observan en la parte superior del equipo unos símbolos (figura 59), los cuales determinan la localización exacta de cada imperfección.

Figura 59. Simbología del Omniscan



DA: Profundidad de la falla

X: distancia entre el frente de la zapata y la salida de la zapata

PA: distancia del frente de la zapata hasta la falla

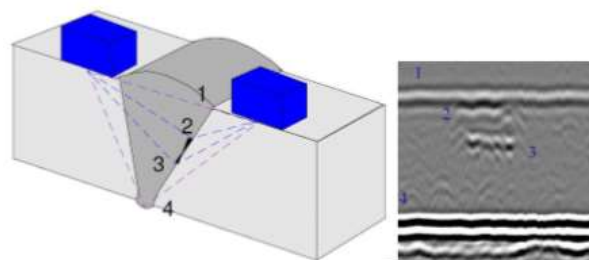
Theta: ángulo de la zapata, viene predeterminado en ella.

SA: longitud de piernas

A%: porcentaje de amplitud

**4.1.2 Lectura de las Distintas Fallas en una Soldadura.** En las figuras del 60 al 66, se muestran las distintas fallas obtenidas en el omniscan.

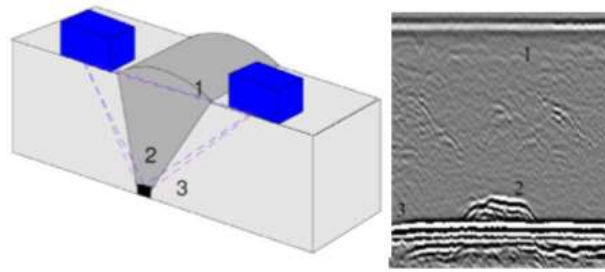
Figura 60. Falta de fusión



Falta de fusión en el lateral

Fuente: Dassel sistemas

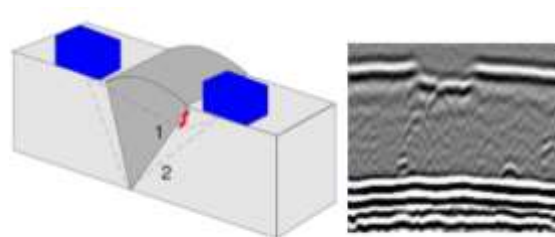
Figura 61. Penetración en la raíz



Falta de penetración en la raíz

Fuente: Dasel sistemas

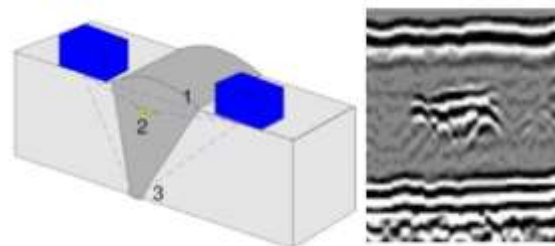
Figura 62. Fisura



Fisura próxima a la superficie

**Fuente:** Dasel sistemas

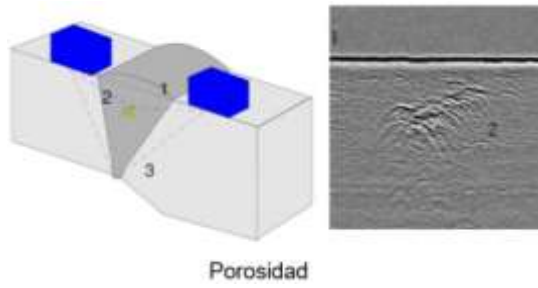
Figura 63. Carencia de fusión interna



Falta de fusión interna

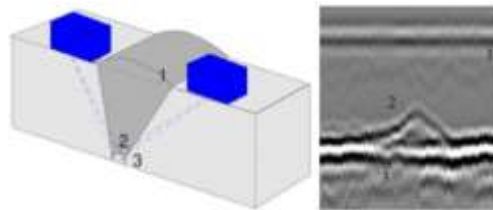
Fuente: Dasel sistemas

Figura 64. Porosidad



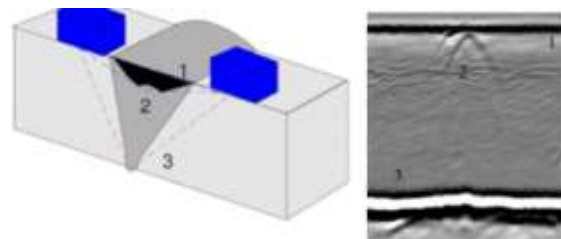
Fuente: Dasel sistemas

Figura 65. Cavity de raíz



Fuente: Dasel sistemas

Figura 66. Fisura transversal



Fuente: Dasel sistemas

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS

Al realizar la inspección aplicando la técnica de ultrasonido phased array al cordón de soldadura de las placas de acero 1020 y 1045, las cuales se muestran en la figura 67, se obtuvieron los siguientes resultados presentados en las tablas 8, 9, 10, 11 y 12 de las imperfecciones encontradas:

Figura 67. Cordón de soldadura en las placas de acero 1020 y 1045



Las especificaciones presentadas en la tabla 8, 9, 10, 11 y 12 se obtuvieron mediante la interpretación de los datos arrojados por el omniscan. Del mismo modo, se pueden hallar utilizando las fórmulas presentadas en la sección 2.6.5 y 2.6.6. Para hallar la longitud del salto y medio salto, esto para delimitar la zona de barrido de la zapata (ver figura 68), se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\frac{SD}{2} = e \cdot \tan \theta \quad SD = 2 \cdot e \cdot \tan \theta$$

$e = 11$  mm espesor de cada placa

$\theta = 36^\circ$  ángulo de la zapata

Figura 68. Zona de barrido



Para hallar la profundidad de la discontinuidad se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$DS = DA \cdot \sin \theta$$

$$PROFUNDIDAD = DA \cdot \cos \theta$$

Donde:

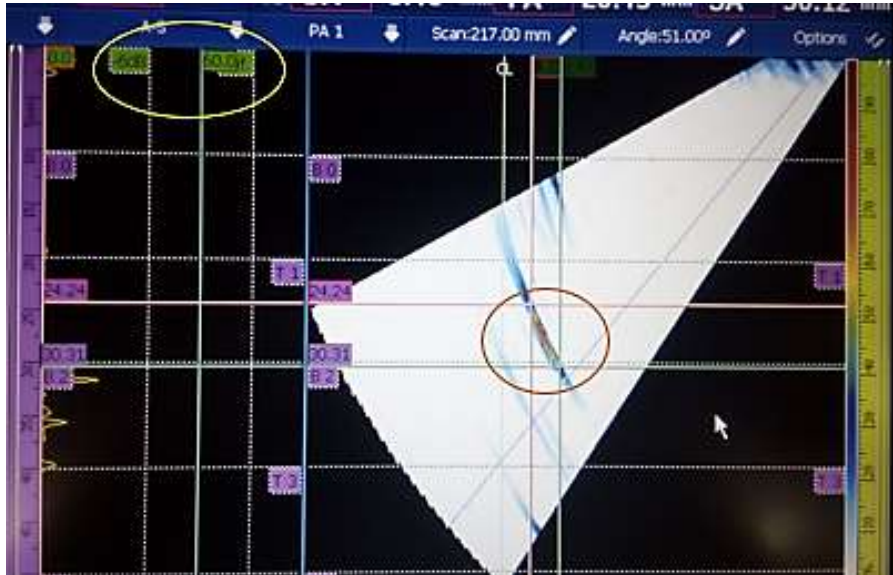
DS: distancia superficial

DA: distancia angular

$\theta = 36^\circ$  ángulo de refracción

De esta manera se hallan tanto la zona de barrido de la zapata como la profundidad de la discontinuidad. Para conocer el tamaño y diámetro se utilizan las asíntotas del omniscan y para saber su longitud, se emplea la opción de la técnica de la caída de los -6 dB (ver figura 69) presente en el equipo omniscan.

Figura 69. Asíntotas del omniscan



El otro método es interpretar los datos arrojados por el equipo (ver figura 70). A continuación, se muestra el significado de cada uno de los símbolos arrojados por el omniscan.

DA: Profundidad de la falla

X: distancia entre el frente de la zapata y la salida de la zapata

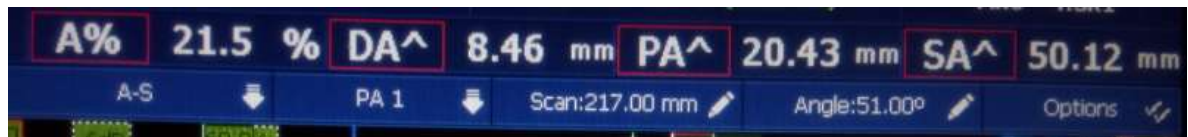
PA: distancia del frente de la zapata hasta la falla

$\theta$ : ángulo de la zapata, viene predeterminado en ella.

SA: longitud de piernas

A%: porcentaje de amplitud

Figura 70. Datos arrojados por el omniscan



De este modo se caracterizan las discontinuidades presentes en la soldadura. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las distintas soldaduras analizadas.

Tabla 7. Soldadura en ranura tipo V


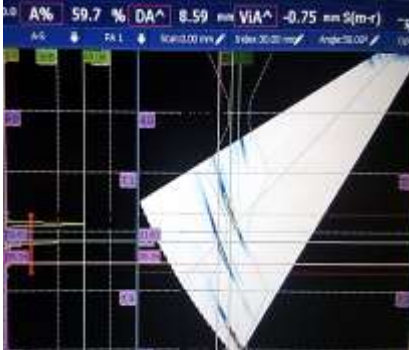
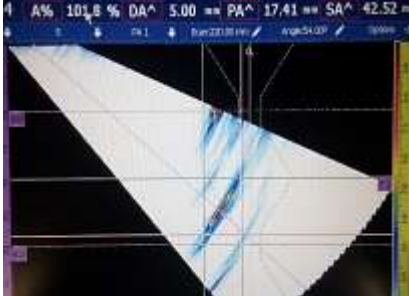
Tipo de discontinuidad	Imagen	Especificación
<b>Grieta</b>		<p>Grieta a una profundidad de 8,46 mm de la superficie, con una longitud de 6,07 mm y un ancho de 3 mm, a una distancia de 20,43 mm desde el frente de la zapata, detectada con la primera pierna de longitud 50,12 mm</p>
<b>Porosidad</b>		<p>Grupo de poros ubicados a 8,59 mm de la superficie, con una longitud de 3,73 mm y un ancho de 2,81 mm, con un diámetro menor a 1 mm cada uno, detectados con la primera pierna.</p>
<b>Falta de penetración</b>		<p>Falta de penetración de la soldadura en el borde a 5 mm de profundidad, 17,41 mm desde el borde de la zapata detectado con la primera pierna a una distancia de 42,52 mm, con una longitud de 4 mm y un ancho de 3 mm</p>

Tabla 8. Soldadura en ranura tipo V doble



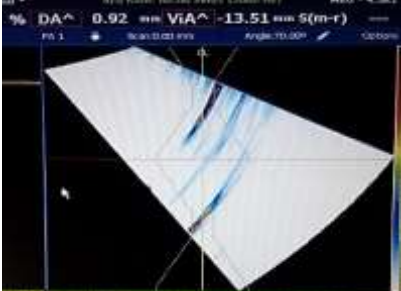

Tipo de discontinuidad	Imagen	Especificación
<b>Grieta</b>		<p>Grieta a una profundidad de 4.28 mm de la superficie, con una longitud de 5 mm y un ancho de 4 mm, a una distancia de 23.86 mm desde el frente de la zapata, detectada con la primera pierna de longitud 45.81 mm</p>
<b>Grieta</b>		<p>Grieta ubicada a 1.58 mm de la superficie, con una longitud de 2.37 mm y un ancho de 2,1 mm, a una distancia de 11.32 mm desde el frente de la zapata, detectada con la primera pierna de longitud 32.93 mm</p>
<b>Poros</b>		<p>Grupo de poros ubicados a 0.92 mm de la superficie, con una longitud de 3.3 mm y un ancho de 5 mm, detectado con la primera pierna.</p>

Tabla 9. Soldadura en ranura tipo U

Tipo de discontinuidad	Imagen	Especificación
<b>Poros</b>		<p>Porosidad a una profundidad de 5.67 mm de la superficie, con una longitud de 4 mm y un ancho de 3 mm, detectado con la primera pierna a una distancia de 30.31 mm</p>


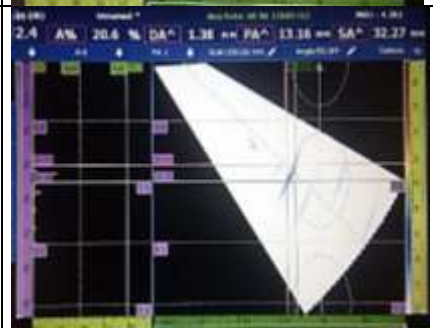
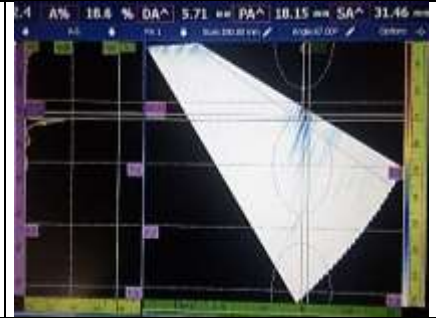
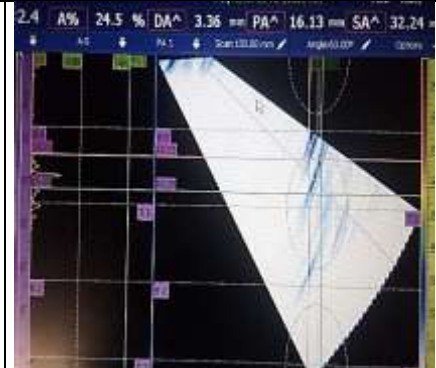
<p><b>Grieta</b></p>		<p>Grieta a una distancia de 4.99 mm de la superficie, con una longitud de 2.5 mm y un ancho de 1.8 mm, detectada con la primera pierna con una longitud de 33.31 mm</p>
<p><b>Porosidad</b></p>		<p>Grupo de poros, ubicado a 1.38 mm de la superficie, con una longitud de 3.5 mm, y un ancho de 2 mm, detectado con la primera pierna con una longitud de 32.27 mm</p>

Tabla 10. Soldadura en ranura tipo U doble

Tipo de discontinuidad	Imagen	Especificación
<p><b>Falta de penetración en la raíz</b></p>		<p>Con una longitud de 1.8 mm y un ancho de 1.5 mm, detectado con la primera pierna con una longitud de 31.46 mm, a una distancia del frente de zapata de 18.15 mm</p>
<p><b>Poros</b></p>		<p>Grupo de poros ubicados a 3.36 mm de la superficie, con una longitud de 4 mm y un ancho de 2 mm, detectado con la primera pierna con una longitud de 32.24 mm</p>


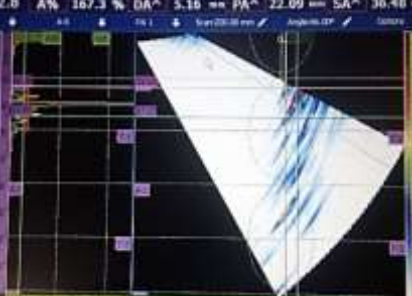
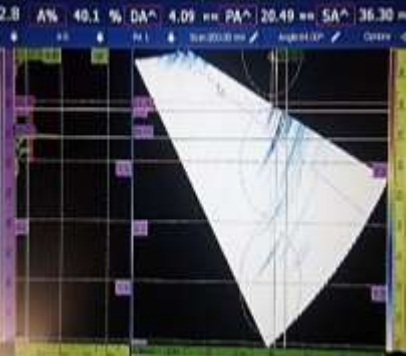
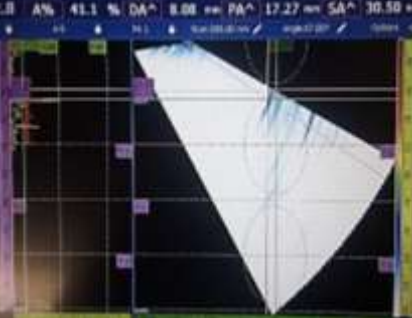
<p><b>Suciedad</b></p>		<p>Suciedad ubicada a 2.69 mm de la superficie, con una longitud de 3.8 mm y un ancho de 2.3 mm, detectado con la primera pierna con una longitud de 33.73 mm</p>
------------------------	--	---

Tabla 11. Soldadura en ranura cuadrada sencilla

Tipo de discontinuidad	Imagen	Especificación
<p><b>Falta de penetración</b></p>		<p>Falta de penetración en la raíz de la soldadura, con un ancho de 3 mm y una longitud de 4 mm, detectado con la primera pierna con una longitud de 34.48 mm</p>
<p><b>Grieta</b></p>		<p>Grieta ubicada a 4.09 mm de la superficie, con una longitud de 5 mm y un ancho de 3.2 mm, detectada con la primera pierna con una longitud de 36.30 mm</p>
<p><b>Falta de fusión en la raíz</b></p>		<p>Falta de penetración de soldadura a 8.08 mm de la superficie, con una longitud de 1.68 mm con un ancho de 2.5 mm, detectado con la primera pierna con una longitud de 30.5 mm, a una distancia de la zapata de 17.27 mm</p>

## 6. CONCLUSIONES

Una vez elaborado el manual con la descripción de la metodología indicada para realizar una buena toma de datos, se garantiza así la detección de las imperfecciones en soldadura y se establece un aporte profesional con el que los ingenieros mecánicos podrán ampliar su campo de desempeño.

Así mismo, una vez analizadas las tablas 5,6 y 7, en las que se evidencia la ganancia en decibeles de los aceros 1018, 1020 y 1045, se percibe el fenómeno de impedancia que aumenta al tomar como valor de referencia la impedancia del acero 1018.

Lo anterior toma sentido, debido al carbono presente en las probetas, lo que indica que a mayor porcentaje de carbono la impedancia aumenta, razón por la cual es necesario incrementar la ganancia en el omniscan, para garantizar la observación de la falla.

Sin embargo el camino de reforzar la aplicación de la metodología de calibración para ensayos con el omniscan enfocados en el phased array, se logra la elaboración de dos nuevas probetas, una de acero 1020 y otra de acero 1045.

Luego de desarrollar lo anterior mente descrito, se establece la detección perfecta de fallo en la soldadura, todo gracias a la forma en la que se calibraron la piezas y se estableció la importancia de dicha calibración hecha en los patrones para la detección exitosa y eficaz de los fallos.

## 7. RECOMENDACIONES

Antes de iniciar la calibración del equipo, cerciorarse que tanto la unión entre el palpador y la zapata como la probeta deben tener suficiente gel conductor para evitar averías de los elementos.

La zapata se debe pasar con suavidad tanto en la superficie de las probetas como en las placas, ya que esta puede rayarse y presentar mediciones erróneas.

Tener en cuenta qué sistema de medición tiene el omniscan (sistema internacional o sistema ingles) al momento de realizar la configuración, ya que se puede incurrir en un error de medición.

Si no se tiene la geometría exacta de la soldadura a inspeccionar, se puede seleccionar la “V compensada” ya que esta opción nos da una ayuda de corrección de geometría durante la inspección

Al realizar la calibración de velocidad del material tener en cuenta que el omniscan ofrece un máximo de  $\pm 20$  m/s de margen de error; si la velocidad hallada por el software (real) excede este margen de error (respecto a la velocidad teórica), se debe repetir el proceso.

## BIBLIOGRAFIA

Andrade. Erick. (2016). CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DE ULTRASONIDO EPOCH 1000L Y PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE LOS CORDONES DE SOLDADURA DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE CIENCIAS AGROPECUARIAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ. Portoviejo, Ecuador.

DIN 54119 (1981-08): Non-destructive testing; ultrasonic inspection; terms.

DIN 54120: non-destructive testing; calibration block 1 and its used for the adjustment and control of ultrasonic echo equipment.

DIN 54123: non-destructive testing; ultrasonic method of testing claddings; produced by welding, rolling and explosion.

L. Angrisani, L. Bechou, D. Dallet, P. Daponte, Y. Ouesten. DETECTION AND LOCATION OF DEFECTS IN ELECTRONIC DEVICES BY MEANS OF SCANNING ULTRASONIC MICROSCOPY AND THE WAVELET TRANSFORM MEASUREMENT, Volume 31, Issue 2, March 2002, pagina 77.

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](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/PRUEBA%20DE%20ULTRASONIDO.pdf).

Maranit T. Luis. (2000). ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LOS BLOQUES DE CALIBRACIÓN, PIEZAS DE REFERENCIA Y ESPECÍMENES POR EL MÉTODO

DE ULTRASONIDO. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Recuperado de <http://saber.ucv.ve/bitstream/123456789/6885/1/TesisPDF.pdf>.

Marino. Jose. (2014). ESTUDIO DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL MEDIANTE ULTRASONIDOS PHASED ARRAY. UNIVERSIDAD DEL BIO BIO. CONCEPCIÓN. Chile. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/343782776/Tesis-Estudio-de-integridad-estructural-mediante-ultrasonidos-Phased-Array-pdf>.

Marzo de 2011. Ensayos no destructivos en la soldadura. Revista digital para profesionales de la enseñanza, pp 6-8. Disponible en <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8259.pdf>

Olympus. DETECTOR DE DEFECTOS OMNISCAN MX2. 2017. Disponible en: <https://www.olympus-ims.com/es/omniscan-mx2/#!>

Rimoldi. Claudio, Mundo. Luis. Ensayos no destructivos. Apuntes de clase. P. 10

Segura, Juan. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE POROSIDAD EN JUNTAS SOLDADAS DE TUBERÍA DE ACERO ASTM A-36 REALIZADOS POR PROCESO SMAW, MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS ESPECIFICADOS. [Trabajo de grado]. Bogotá, Colombia. 2015. Universidad Santo Tomas.

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 Non Destructive Testing - Advanced Concepts and Applications (National Instruments). (Turoria).