



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA Y MATERIALES

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN METALURGIA Y CIENCIA DE LOS
MATERIALES**

**DETECCIÓN ULTRASÓNICA DE DEFECTOS EN SOLDADURA CON
ARREGLO DE FASES**

**Tesis que para obtener el grado de maestro en Metalurgia y Ciencia de los
Materiales**

ALUMNO: ING. BRAULIO CARAPIA TELLEZ.

ASESOR: PhD. HÉCTOR GUILLERMO CARREÓN GARCIDUEÑAS.

CO-ASESOR: PhD. CUAUHTÉMOC MALDONADO ZEPEDA.

Morelia Michoacán Febrero del 2016

Índice General.

Índice de figuras y tablas.....	iv
Nomenclatura.....	vii
Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	x
1.1 Justificación.....	xii
1.2 Objetivo General.....	xiii
1.2.1 Objetivos Particulares.....	xiii
1.3 Hipótesis.....	xiii
CAPÍTULO II. REVISIÓN Y DISCUSIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....	1
2.1 Información general sobre las discontinuidades.....	1
2.1.1 Conceptos relacionados con las discontinuidades	1
2.2 Criterios y métodos para evaluar indicaciones de discontinuidades.....	3
2.2.1 Características dimensionales de las discontinuidades.....	4
2.2.2 Dimensionamiento de las discontinuidades.....	5
2.3 Principales defectos en la soldadura.....	6
2.3.1 Grietas.....	6
2.3.2 Falta de fusión lateral.....	6
2.3.3 Porosidad.....	7
2.3.4 Escoria atrapada.....	8
2.4 ¿Qué es el ultrasonido?.....	8
2.5 Tipos o modos de ondas del ultrasonido.....	10
2.5.1 Ondas longitudinales o de compresión.....	10
2.5.2 Ondas transversales o de corte.....	11
2.5.3 Ondas superficiales o de Rayleigh.....	12
2.5.4 Ondas de placa o de Lamb.....	12
2.6 Método de Pulso-Eco.....	13
2.7 Cálculo de las velocidades de propagación del sonido en un material.....	14
2.7.1 Módulo de Elasticidad.....	14
2.7.2 Módulo de Corte.....	14
2.7.3 Coeficiente de Poisson.....	14
2.8 Relaciones entre las velocidades de propagación del sonido y las propiedades mecánicas de un material.....	15
2.9 Relaciones entre velocidades de propagación del sonido.....	15
2.10 Impedancia acústica.....	16
2.11 Presión acústica.....	16
2.12 Energía acústica específica.....	17
2.13 Intensidad acústica.....	18
2.14 Incidencia perpendicular o normal.....	18
2.14.1 Coeficientes de reflexión y de transmisión.....	18
2.15 Incidencia angular y conversión de modo.....	19
2.15.1 Refracción y conversión de modo.....	20
2.16 Ley de Snell.....	20

2.16.1 Refracción de una onda.....	20
2.16.2 Implicaciones de las ondas refractadas.....	20
2.16.3 Ley de reflexión.....	21
2.16.4 Ley de Snell.....	22
2.17 Piezoelectricidad.....	22
2.17.1 Materiales piezoeléctricos.....	23
2.18 Sistema de ultrasonido de arreglo de fases.....	24
2.19 Principio de la eliminación física de la onda.....	24
2.20 Ventajas del arreglo de fases en comparación con el ultrasonido convencional.....	26
2.21 Transductores de arreglo de fases.....	27
2.21.1 Características del haz ultrasónico.....	27
2.22 Propiedades fundamentales de la onda de sonido.....	30
2.22.1 Características de un palpador de arreglo de fases.....	32
2.23 Zapatas de arreglo de fases.....	34
2.24 Pulsado en fase.....	34
2.25 Fundamentos de las imágenes de arreglo de fases.....	37
2.26 Datos de la presentación tipo A (A-Scan).....	38
2.27 Presentación tipo sectorial (S-Scan).....	38
2.28 Formato de combinación de imagen.....	39
2.29 Discusión de trabajos previos.....	40
CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	45
3.1 Fabricación de probetas.....	45
3.1.1 Probetas de cobre	45
3.1.2 Probetas de aluminio.....	48
3.2 Probetas soldadas.....	49
3.3 Equipo de arreglo de fases ultrasónico.....	51
3.4 Palpadores de arreglo de fases del equipo ultrasónico.....	52
3.5 Calibración de haz normal y angular.....	53
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	54
4.1 Cálculo de la primera y segunda pierna para la zona de inspección.....	54
4.2 Zonas e interpretación en la combinación de imágenes de arreglo de fases.....	55
4.3 Efecto de la orientación de los defectos con respecto a la incidencia del haz ultrasónico.....	56
4.3.1 Imágenes S-Scan para acero X60 con defectos con orientación vertical.....	57
4.3.2 Imágenes S-Scan para acero X65 con defectos con orientación horizontal.....	59
4.4 Efecto de la frecuencia de Inspección en la detección.....	61
4.4.1 Efecto de la frecuencia en las imágenes S-Scan en probetas de cobre.....	62
4.4.1.1 probetas de cobre con inclusiones cilíndricas.....	62
4.4.1.2 probetas de cobre con inclusiones de forma elíptica.....	64
4.4.2.3 Probetas de aluminio con defectos simulados.....	66
4.4.2.4 Probetas soldadas de acero al carbón.....	68
4.5 Efecto de la morfología de los defectos sobre las imágenes y señales del arreglo de fases.....	70
4.5.1 Heterogeneidad de morfología plana.....	70
4.5.2 Heterogeneidad de morfología cilíndrica.....	71
4.5.3 Imágenes S-Scan de las probetas soldadas de acero al carbón.....	72

4.5.3.1 Probeta de acero al carbón A572 a tope sin preparación de borde...	72
4.5.3.2 Probeta de acero al carbón A572 en posición T sin preparación de junta.....	74
4.6 Imágenes S-Scan de probetas de acero al carbón con preparación de borde.....	76
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
ANEXO.....	85
Índice de figuras y tablas.	
Figura 1.1 Diagrama de fase Fe-C.....	xi
Figura 1.2 Tubería de transporte de hidrocarburos API 5L (HSLA).....	xii
Figura 2.1 Grieta por fatiga.....	3
Figura 2.2 Inspección Ultrasónica para Dimensionar Discontinuidades.....	5
Figura 2.3 a) Configuración típica de una grieta dentro de la soldadura en el material de aporte, b) forma de la señal en A-Scan de una grieta.....	6
Figura 2.4 a) Macrografía que muestra un defecto dentro de la soldadura por fusión incompleta, b) señal A-Scan del defecto por fusión incompleta.....	7
Figura 2.5 a) Macrografía y b) Señal Ultrasónica en Forma A-Scan de la Porosidad.....	7
Figura 2.6 a) macrografía que muestra una inclusión de escoria dentro de la soldadura b) señal de ultrasonido característica de una inclusión de escoria en A-Scan.....	8
Tabla 2.1 El espectro de ondas acústicas en tres zonas con base en su rango de frecuencia...	9
Figura 2.7 Ondas Longitudinales o de Compresión.....	10
Figura 2.8 Ondas Transversales o de Corte.....	11
Figura 2.9 Ondas Superficiales o de Rayleigh.....	12
Figura 2.10 ondas de placa o de lamb.....	13
Tabla 2.2 Impedancia Acústica según el Medio Elástico.....	16
Figura 2.11 Ley de reflexión.....	21
Figura 2.12 Ley de Snell.....	22
Figura 2.13 Efecto piezoeléctrico.....	23
Tabla 2.3 Características Físicas de los Materiales Piezoeléctricos más Comunes.....	23
Tabla 2.4 Comportamiento de los materiales piezoeléctricos más comunes durante la inspección ultrasónica.....	24
Figura 2.14 Construcción típica Multi-elementos.....	24
Figura 2.15 Formación del Haz y Tiempo de Retardo para Pulsado y Recepción Múltiple de Haces (Fase y Amplitud).....	25
Figura 2.16 Haz Angular Generado por un Palpador Plano por Medio de Retardo Variable.	26
Figura 2.17 Principio del Elemento transductor Piezoeléctrico.....	27
Figura 2.18 Campo de Sonido de un Transductor.....	29
Tabla 2.5 Constante de relación de aspecto.....	30
Figura 2.19 Propagación del Haz.....	31
Figura 2.20 Corte-sección del Palpador de Arreglo de Fases.....	32
Figura 2.21 Parámetros dimensionales de un palpador de arreglo de fases.....	33
Figura 2.22 Zapatas para Palpador de Arreglo de Fases.....	34
Figura 2.23 Efectos del Desfasamiento: Combinación y Cancelación.....	35
Figura 2.24 Frente de onda angular.....	36

Figura 2.25 Datos del A-Scan.....	38
Figura 2.26 -30° a +30° S-Scan.....	39
Figura 2.27 Formato de Imagen Múltiple.....	40
Figura 2.28 Esquema de la posición óptima para la detección del defecto en la superficie posterior de una sección de codo con una imagen en S-Scan. [26].....	41
Figura 2.29 Comparación de imagen S-scan de grietas en la superficie inferior simulada y experimental en un espécimen de tubería. [26].....	41
Figura 2.30 Ejemplo de la evaluación de la altura de la grieta, usando el pico anterior y posterior. [27]	42
Figura 2.31 Ejemplo de la medición de la altura de la grieta usando la técnica de corrección de volumen en las imágenes S-Scan. a) HPA=0.8 mm; HC= 0.6 mm en la barra; b) HPA = 1.4 mm; Hc = 1.2 mm en la barra. [27].....	43
Figura 2.32 capacidad de dimensionamiento de grietas para la técnica de arreglo de fases: a) ondas de corte b) ondas longitudinales [27].....	43
Tabla 2.6 Características de las grietas implantadas en la muestra de tubería. [28].....	44
Figura 2.33 Vista en B-Scan del espécimen 1, segmento 1, desde el lado cercano y el lado lejano con arreglos TRL Y TRS. [28].....	44
Figura 3.1 Esquema usando arreglo de fases con distintos ángulos de inspección.....	45
Figura 3.2 Barra de cobre con inclusiones de estaño con diferentes profundidades.....	46
Figura 3.3 Barras de cobre con inclusiones de estaño con diámetros de 7.938, 6.35, 4.76 y 3.18 mm. Con profundidades de 1.27, 3.81 y 6.35 mm, respectivamente.....	47
Tabla 3.1 Dimensiones de las inclusiones elípticas.....	47
Figura 3.4 Configuración esquemática de las probetas #7, #8, #9 con inclusiones de forma elíptica.	47
Tabla 3.2 Propiedades físicas del cobre y estaño.....	47
Figura 3.5 Probeta de aluminio con barrenos vacíos.....	48
Tabla 3.3 Propiedades físicas de Aluminio y el Aire.....	49
Figura 3.6 probeta de X60 con defectos simulados.....	49
Figura 3.7 probeta con defectos simulados en forma horizontal en acero microaleado X65.....	50
Figura 3.8 Configuración de las probetas a tope de acero al carbón.....	50
Figura 3.9 Configuración de las probetas soldadas en posición T.....	51
Figura 3.10 Equipo para inspección ultrasónica con Arreglo de Fases.....	51
Tabla 3.4 Especificaciones del Equipo de arreglo de fases ultrasónico.....	52
Tabla 3.5 Palpadores Utilizados en el Olympus Epoch 1000i.....	52
Tabla 3.6 Zapatas utilizadas en el Olympus Epoch 1000i.....	52
Figura 3.11 bloques de calibración para el equipo de arreglo de fases.....	53
Figura 4.1 Esquema de la interacción de haz ultrasónico en la primera pierna (L1) y segunda pierna (L2).....	54
Tabla 4.1 valores calculados para la primera y segunda pierna.....	54
Figura 4.2 Partes que comprenden una imagen S-Scan de arreglo de fases.....	55
Figura 4.3 Evaluación de una imagen S-Scan mediante la utilización de los cursores X-Y.....	55
Figura 4.4 Probetas de acero microaleado con defectos simulados en distinta orientación... ..	56
Figura 4.5 Imágenes S-Scan para la soldadura de acero microaleado X60 con 3 defectos simulados en forma vertical a 5MHZ de frecuencia.....	57

Figura 4.6 Imágenes S-Scan para la soldadura de acero microaleado X60 con defectos simulados en forma vertical para las distancias L1, Lint y L2 utilizando ángulos de 45° y 65° y una frecuencia de 10MHz.....	58
Figura 4.7 Imágenes S-Scan para la soldadura de acero microaleado x65 con defectos simulados en forma horizontal a 5mhz de frecuencia.....	59
Figura 4.8 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero microaleado X65 con defectos simulados de forma horizontal y 10MHz de frecuencia.....	60
Tabla 4.2 Frecuencias utilizadas en la inspección ultrasónica.....	61
Figura 4.9 imágenes S-Scan de la probeta de cobre #1 a 5 MHz, a) primer defecto, b) segundo defecto, c) tercer defecto, d) cuarto defecto.....	62
Figura 4.10 Imágenes S-Scan de la probeta de cobre #1 a 10 MHz de frecuencia, a) primer defecto, b) segundo defecto, c) tercer defecto, d) cuarto defecto.....	63
Figura 4.11 Imágenes S-Scan de la probeta de cobre con defectos simulados de forma elíptica a 5MHZ.....	64
Figura 4.12 Imágenes S-Scan de la probeta de cobre con defectos simulados de forma elíptica a 10MHZ.....	65
Figura 4.13 Imágenes S-Scan de la probeta de aluminio con 4 defectos simulados inspeccionada con 5MHz de frecuencia.....	66
Figura 4.14 Imágenes S-Scan de la probeta de aluminio con 4 defectos simulados inspeccionada con 10MHz de frecuencia.....	67
Figura 4.15 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero A572 a tope para las distancias L1, Lint y L2 utilizando ángulos de 45° Y 65° respectivamente y una frecuencia de 5 MHz.....	68
Figura 4.16 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero A572 a tope utilizando una frecuencia de 10MHz y ángulos de 45° y 65°.....	69
Figura 4.17 Efecto de la morfología de las discontinuidades en las señales A-Scan.....	70
Figura 4.18 Efecto de la morfología cilíndrica sobre la señal del eco.....	71
Figura 4.19 Imágenes S-Scan de la probeta soldada de acero al carbón A572 sin preparación de borde a tope, frecuencia de 5MHz.....	72
Figura 4.20 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero A572 a tope, utilizando una frecuencia de 10 MHz y ángulos de 45° y 65°.....	73
Figura 4.21 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero A572 en posición T para las distancias L1, Lint y L2 utilizando ángulos de inspección de 45° y 65°y frecuencia de 5MHz.....	74
Figura 4.22 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero en posición T para las distancias L1, Lint y L2 utilizando los ángulos de 45° y 65°, frecuencia de 10MHz.....	75
Figura 4.23 Soldadura de acero al carbón con falta de fusión lateral.....	76
Figura 4.24 Soldadura de acero al carbón con electrodo revestido.....	76
Figura 4.25 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero al carbón con preparación de borde a 5MHz.....	77
Figura 4.26 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero al carbón con preparación de borde a 10MHz.....	78
Figura 4.27 Imágenes S-Scan de la soldadura de referencia de acero al carbón con 5 MHz de frecuencia.....	79
Figura 4.28 Imágenes S-Scan de la soldadura de referencia de acero al carbón con 10 MHz de frecuencia.....	80

Nomenclatura

END: Ensayos No Destructivos.

UT: Ultrasonido.

dB: Decibeles.

λ : Longitud de Onda.

PA: Phased Array (Arreglo de Fases).

σ : Esfuerzo de Tracción o de Compresión.

E: Modulo de Elasticidad.

ϵ : Deformación Unitaria.

G: Modulo de Corte.

τ : Esfuerzo de Corte.

γ : Deformación Unitaria.

μ : Coeficiente de Poisson.

ϵ_1 : Deformación Unitaria en la Dirección Paralela al Esfuerzo.

ϵ_2 : Deformación Unitaria en la Dirección Perpendicular al Esfuerzo.

C_L : Velocidad Longitudinal o de Compresión.

C_T : Velocidad Transversal o de Corte.

C_S : Velocidad Superficial.

Z: Impedancia Acústica.

ρ : Densidad.

C_m: Velocidad Máxima de Vibración en el Material.

P: Presión Acústica.

ω : Frecuencia Angular.

E_e : Energía Acústica Específica.

C: Velocidad de Transmisión del Sonido.

I_A : Intensidad Acústica.

α : Ángulo de Incidencia.

β : Ángulo de Reflexión.

N: Longitud de Campo Cercano.

f : Frecuencia.

$\sin \theta_{st}$: Seno del Ángulo de Dirección Máximo.

e: Ancho del Elemento.

D: Diámetro del Elemento.

A-Scan: Formato de pulso-eco en el que la visualización de los datos muestra el tiempo de viaje del pulso en la dirección horizontal que representa los trayectos del sonido correspondientes.

B-Scan: Vista ultrasónica de un corte vertical a través de la Componente.

C-Scan: Vista ultrasónica, vista en planta de los componentes.

S-Scan: Escaneo sectorial, la inspección Phased Array que barre a través de una gama de ángulos.

σ : Conductividad Eléctrica.

k: Conductividad Térmica.

T6: Tratamiento Térmico en Solución y Envejecido Artificial.

SAW: Soldadura por Arco Sumergido (Submerged Arc Welding).

ERW: Soldadura por Resistencia Eléctrica (Electric Resistance Welding).

API: Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute).

ASME: Sociedad Americana de Ingenieros Mecanicos (American Society of Mechanical Engineers).

PEMEX: Petróleos Mexicanos.

AWS: Sociedad Americana de Soldadura (American Welding Society).

ZAT: Zona Afectada Térmicamente.

DAC: Corrección de la Distancia de la Amplitud.

TVG: Ganancia Variando el Tiempo.

CSC: Control para la Corrección de Superficies Curvas.

Resumen

En este trabajo se investiga la detección y clasificación de defectos e imperfecciones; a) creadas artificialmente, y b) en uniones soldadas. Utilizando la tecnología de Arreglo de fases ultrasónica, la cual está basada en la transmisión del sonido a través del material o medio en estudio, utilizando para ello la técnica de Pulso-Eco que consiste en generar un pulso ultrasónico que es transmitido a través del material y cuando la onda choca con una interface, parte de la onda se refleja regresando al transductor.

Se crearon probetas de cobre con inclusiones metálicas de estaño con diferentes dimensiones y profundidades (50%, 30% y 10%) respectivamente. Además probetas de aluminio con perforaciones que simulan porosidad. De igual forma se inspeccionaron y clasificaron los defectos en una soldaduras en acero API X60 y X65, utilizado en ductos (PEMEX), ello con la finalidad de realizar una comparación entre defectos simulados y defectos reales, así como la inspección de soldaduras realizadas con acero A573 Gr50 soldadas con el proceso de soldadura de electrodo revestido, en tres configuraciones diferentes: a tope, con bisel y en T.

Se generaron una serie de imágenes en presentación tipo sectorial (S-Scan), el cual consiste en la respuesta de la forma de onda de cada ángulo, se digitaliza en código de colores y se representa en el ángulo correspondiente apropiado para la construcción de una imagen de corte transversal.

Palabras clave: ultrasonido, arreglo de fases, defecto, A-Scan, S-Scan.

Abstract

This research work, it was reported the detection and classification of defects and discontinuities examiner a) artificially created and b) in a weld joint. It was used the new ultrasonic NDE technology: Phased Array which it is based on the introduction of the sound through the studied medium using the pulse-echo technique. This technique measures the amount of time for the sound to travel through the test object and back to the transducer.

Several copper samples were machined with tin metallic inclusions of different sizes and depths respectively (50%, 30% y 10%). Aluminum samples with drilled holes simulating porosity were also machined. In addition, welding API X60 and X65 steel samples, used in the petroleum industry (PEMEX), were inspected to compare between real and simulated defects in metallic samples.

A series of images in S-scan (Sectorial Scan) with color codes were generation flags images sweeps through a range of angles using the same focal distance and elements. The S-scan represents a 2-D view from a specific channel corrected for delay and refracted angle. And inspection of weld joints made with A572 GR50 by the SMAW in three different joints type: Butt, bevel and T.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

En México, la tubería de aceros se utiliza ampliamente en la industria petrolera para el transporte de los hidrocarburos. Aproximadamente una red de 14,182 Km, misma que se divide en 5,198.7 Km de oleoductos y 8,992.7 Km de poliductos que se han instalado para el transporte de los hidrocarburos líquidos y gaseosos [1].

La inspección de soldaduras por medio del uso de Pruebas No Destructivas tiene dos funciones:

- El control de calidad, lo que involucra el monitoreo del soldador y de la funcionalidad del equipo, así como, la calidad de los consumibles y del material base utilizados.
- La aceptación o rechazo de una soldadura, con base en su capacidad propuesta y su capacidad bajo las condiciones de servicio impuestas sobre la estructura.

El método adecuado de inspección puede ser diferente para cada función. Existe un número de factores que influyen en la selección de la Prueba No Destructiva adecuada para la inspección de soldaduras estructurales, estos factores puede incluir: las características de las discontinuidades, los requisitos de mecánica de fractura, el análisis de esfuerzos, los materiales de ingeniería, el acceso a la zona de inspección, la geometría de la estructura (plana, curva, gruesa, delgada, etc.), la condición de la superficie, la etapa de la inspección (fabricación, servicio), el medio ambiente (hostil, bajo el agua, etc.), el tiempo de inspección disponible, etc. En general, es necesario ejercer un juicio de ingeniería para que pueda establecerse un orden de importancia de estos factores y determinar la técnica de inspección óptima. Si un método de inspección es considerado como la opción viable, entonces con él las discontinuidades deben ser detectadas, identificadas, localizadas y dimensionadas exactamente, y debe ser establecida su orientación, lo cual puede llevar a considerar que se limita la inspección a una técnica volumétrica. Inclusive, existen códigos y estándares que proporcionan guías para cada método, basados en sus capacidades y limitaciones. Aquí entonces, la inspección ultrasónica contribuye de forma significativa, proporcionando detalles de la condición interna de la soldadura. Además, la inspección ultrasónica es útil en

el desarrollo de técnicas de soldadura y también muchos documentos requieren que la inspección ultrasónica sea empleada en algún grado en la inspección final [2].

Los aceros microaleados conocidos como de alta resistencia y baja aleación (HSLA), son un grupo de aceros de bajo contenido de carbono que utilizan pequeñas cantidades de elementos aleantes como niobio, vanadio y titanio como se observa en la figura 1.1 para obtener resistencia a la cedencia mayores que 275 MPa (40 Ksi) en la condición de laminados ó normalizados [3]. La función principal de los elementos aleantes en estos aceros, es de contribuir al endurecimiento de la ferrita por medio del refinamiento de grano, endurecimiento por precipitación y endurecimiento por solución sólida. Este último está ligado ampliamente a los contenidos de aleación, mientras que los dos efectos anteriores a este, dependen de los efectos del diseño de aleación y de los tratamientos termomecánicos [4].

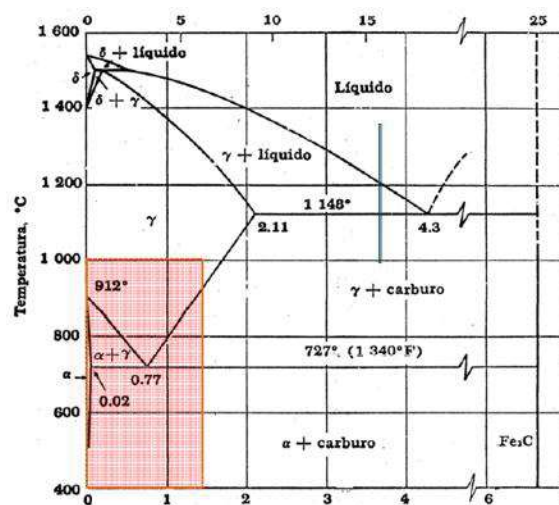


Figura 1.1 Diagrama de fase Fe-C.

Debido a las propiedades de los aceros microaleados su aplicación abarca una gran variedad de productos tales como los que se mencionan a continuación y se muestra un ejemplo de ellos en la figura 1.2:

- Tuberías
- Estructuras

- Puentes
- Maquinaria agrícola
- Paneles automotrices
- Edificios
- Recipientes a presión, etc.



Figura 1.2 Tubería de transporte de hidrocarburos API 5L (HSLA).

1.1 Justificación.

La soldadura de las tuberías de aceros (microaleados, al carbón) al fabricarse mediante los diferentes procesos de soldadura y al ser puestas en servicio pueden tener distintos defectos y discontinuidades, lo que afecta la sanidad de la tubería, lo cual nos lleva a una disminución de las propiedades de dicha tubería. Mediante el uso de los ensayos no destructivos (END), principalmente el ultrasonido con arreglo de fases con el que se pretende detectar estos defectos y discontinuidades aprovechando las ventajas que nos ofrece el ultrasonido con arreglo de fases por su definición en inglés (Phased Array):

- Las soldaduras inspeccionadas no son alteradas en su estructura interna.
- Toda la longitud de la soldadura puede ser evaluada.
- La soldadura puede ser evaluada volumétricamente.
- La soldadura puede ser evaluada en servicio y obtener información en tiempo real.
- El ultrasonido con arreglo de fases (PA) puede usarse en sitio [7].

1.2 Objetivo General.

Aplicación de un sistema para detectar defectos e imperfecciones comunes en ductos fabricados con soldadura, esto por medio de la técnica ultrasónica con arreglo de fases (PA). El sistema estará integrado en un equipo portátil, equipo de transductores y otros instrumentos, todo integrado en un ambiente de instrumentación.

1.2.1 Objetivos Particulares.

- Realizar la calibración del equipo portátil de ultrasonido con arreglo de fases (PA), para los materiales, frecuencias y ángulos seleccionados.
- Realizar la inspección de las soldaduras de los aceros API 5L X60, X65 y acero al carbón A572Gr50, para obtener la información necesaria acerca de los defectos e imperfecciones en tiempo real y elaborar una base de datos.
- Simular defectos e imperfecciones dentro de las probetas de soldadura y observar el comportamiento de la técnica de arreglo de fases ultrasónico.
- Realizar la detección, clasificación y caracterización de los defectos e imperfecciones en las soldaduras de los ductos.
- Observar el comportamiento de la técnica de ultrasonido con arreglo de fases (PA) en un material con una impedancia acústica alta (anisotropía).

1.3 Hipótesis.

La soldaduras de acero microaleado y al carbón con los que se fabrican los ductos utilizados en la industria petrolera, al realizarse la unión soldada se producen defectos e imperfecciones dentro de la soldadura, pudiendo estos ser detectados, clasificados y caracterizados mediante la técnica ultrasónica de arreglo de fases (PA). Los datos experimentales obtenidos de las inspecciones podrán ser relacionados con la sanidad de la soldadura.

CAPÍTULO II. REVISIÓN Y DISCUSIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.

2.1 Información general sobre las discontinuidades

Interpretación: interpretar una indicación es predecir qué tipo de discontinuidad puede ser la que origina dicha indicación.

Para interpretar correctamente una indicación, el inspector debe familiarizarse completamente con:

- El proceso de inspección que se está empleando.
- El material y el proceso de fabricación de la pieza que se inspecciona.

Evaluación: evaluar una indicación es una actividad posterior a la interpretación y consiste en comparar las características de la indicación o de la posible discontinuidad con los requisitos establecidos por las normas de calidad aplicables [7].

Es la ponderación de la severidad de la discontinuidad después de que la indicación se ha interpretado; es decir, el inspector debe decidir si la pieza debe ser aceptada, reparada o rechazada.

2.1.1 Conceptos relacionados con las discontinuidades

Sensibilidad: para la inspección por ultrasonido, la sensibilidad es la capacidad del sistema ultrasónico para detectar discontinuidades que tienen una cierta dimensión establecida por un código, norma o especificación.

Umbral de Detección: el umbral de detección es la capacidad de un sistema de inspección (equipo ultrasónico, cable coaxial, conectores y palpador) para detectar una discontinuidad de un tamaño determinado y producir una indicación que pueda ser interpretada y evaluada sin dificultades.

Una consideración teórico-práctica establece que la longitud de onda (λ) es igual a dos veces el tamaño del defecto crítico; y la discontinuidad más pequeña que se puede detectarse con la prueba ultrasónica se determina mediante la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\lambda}{2} \quad (2.1)$$

Donde:

n = tamaño mínimo de la discontinuidad que es detectable.

λ = longitud de onda.

Indicación: una indicación es la señal de una posible alteración en el material o pieza sujeta a inspección. La indicación se genera a partir del método de inspección no destructivo empleado. Las indicaciones pueden ser:

- Falsas: es aquella que aparece durante la inspección y que puede ser provocada por una mala aplicación del método.
- Relevantes: es producida por una discontinuidad. Para determinar la importancia de una indicación relevante, se debe interpretar la indicación y evaluar la discontinuidad.
- No relevantes: normalmente es producida por la estructura del material o por la configuración de la pieza. En general esta indicación se produce por interrupciones de la configuración de la pieza. También puede ser producida por cambios en algunas características del material, como su tamaño de grano, los tratamientos térmicos de endurecimiento a que ha sido sometido o el acabado superficial.

Discontinuidad: es la falta de homogeneidad o la interrupción en la estructura física normal de un material. También puede ser una deficiencia en la configuración física de una pieza, parte o componente. Las discontinuidades pueden ser:

- No relevantes: es aquella que por su tamaño, forma o localización requiere de ser interpretada; pero no es necesario evaluarla.
- Relevante: es aquella que por su tamaño, forma o localización debe ser interpretada y evaluada.

Discontinuidad Crítica: es la discontinuidad más grande que se puede aceptar o la más pequeña que se puede rechazar.

Defecto: un defecto es toda discontinuidad o la indicación de una discontinuidad que por su tamaño, forma y localización han excedido los límites de aceptación establecidos por el código, norma o especificación aplicable.

Discontinuidades de Servicio: se generan por las diferentes condiciones del servicio al que se sujeta la pieza como:

- Esfuerzos de tensión o compresión.
- Corrosión.
- Fatiga.
- Fricción.
- Erosión.

Grietas por fatiga: Son discontinuidades de servicio que, por lo general, son abiertas a la superficie (ver Figura 2.1). Empiezan en puntos de concentración de esfuerzos y algunas veces son causadas por dislocaciones existentes en la pieza antes de ponerla en servicio.

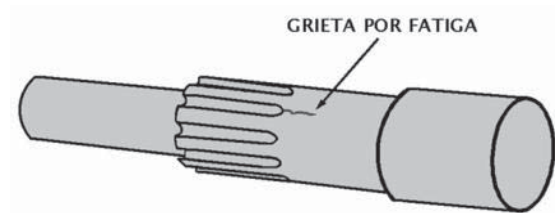


Figura 2.1 Grieta por fatiga.

2.2 Criterios y métodos para evaluar indicaciones de discontinuidades

Gracias al desarrollo de la tecnología, actualmente el ultrasonido industrial es una técnica de inspección versátil que se adapta fácilmente a muy distintas circunstancias y cuyos resultados son altamente confiables. Esta confiabilidad depende en gran parte de que el inspector haga su trabajo apegado a los criterios y métodos que se han probado como los más efectivos [8].

2.2.1 Características dimensionales de las discontinuidades

Desde el punto de vista de la inspección ultrasónica, cualquier discontinuidad presente en un material constituye un obstáculo para el paso de la onda ultrasónica, es decir, con base en el comportamiento del haz ultrasónico al atravesar un material, la presencia de una discontinuidad se manifiesta:

- Por la reflexión que esta ocasiona al emplear el método de pulso-eco,
- Por la disminución de la energía restringida al emplear el método de transparencia.

Si la discontinuidad es grande y tiene una forma regular, se puede obtener toda la información necesaria para determinar sus características, mediante la reflexión del haz. Sin embargo, lo más común es que las discontinuidades naturales sean relativamente pequeñas y de forma irregular, lo que provoca fenómenos que dependen de:

- El tamaño de la discontinuidad en relación con la longitud de onda que se utiliza durante la inspección.
- La orientación respecto del haz ultrasónico.
- Las características acústicas del material que se está inspeccionando.

Cuando se habla del tamaño de una discontinuidad, no se trata de su tamaño real; sino de su área efectiva como reflectora del haz ultrasónico. De acuerdo con este criterio, las discontinuidades se pueden clasificar en:

- Mayores que la sección transversal del haz.
- Menores que la sección transversal del haz.

Antes de evaluar una discontinuidad es preciso dimensionarla; para lo que se toman en cuenta cuatro características:

- Su posición con respecto del haz ultrasónico.
- Su tipo
- Sus dimensiones como el largo y el ancho respecto al haz de ultrasonido.
- Su profundidad.

Definir el tamaño de una discontinuidad (longitud y anchura) es sin duda el aspecto más controvertido de la interpretación y el que ha dado lugar a un gran número de

investigaciones y de bibliografía técnica; especialmente cuando se trata de una discontinuidad cuyo tamaño es menor que la sección transversal del haz ultrasónico.

2.2.2 Dimensionamiento de las discontinuidades

Antes de cualquier estudio de dimensionamiento de una discontinuidad, se deben conocer las características del haz ultrasónico con que se inspecciona y el tipo de palpadores que se emplean. Así mismo, el inspector debe conocer las características del material y el proceso con el que fue fabricada la pieza [10]. Una discontinuidad puede estar en solo dos orientaciones respecto del haz ultrasónico con el que se inspecciona una pieza o material:

- Perpendicular
- Paralela

La orientación de la discontinuidad influye en la calidad de la señal que se obtenga; ya que si su orientación es perpendicular al haz, la señal es intensa y clara. Por el contrario, si la orientación es paralela al haz, la discontinuidad refleja muy poco ultrasonido o no lo refleja; por lo tanto, no se genera una señal que permite detectarla. Por este motivo es necesario identificar cual es la posible orientación de las discontinuidades y seleccionar la técnica más adecuada para detectarlas y evaluarlas. En la Figura 2.2 se observa esquemáticamente la inspección ultrasónica para dimensionar discontinuidades por medio de la técnica de arreglo de fases [11].

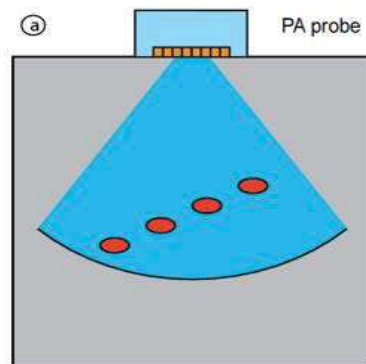


Figura 2.2 Inspección Ultrasónica para Dimensionar Discontinuidades

2.3 Principales defectos en la soldadura.

2.3.1 Grietas.

Las grietas son discontinuidades asociadas con la fractura, las grietas son rupturas lineales de metal bajo tensión, con una muy estrecha separación de la soldadura o del metal base adyacente, y por lo general poca deformación es aparente. Las grietas de soldadura de metal son el resultado de muchos factores. Por ejemplo, el agrietamiento se produce cuando una conexión soldada se encuentra muy restringida debido a que las soldaduras que son demasiado pequeñas en tamaño para las partes que se unen. El agrietamiento es resultado de una práctica pobre de soldadura, inapropiada separación de la junta y electrodos inapropiados para el material de aporte. El inadecuado precalentamiento durante la soldadura de aceros de baja aleación de carbono promueve el agrietamiento del metal de soldadura o la zona afectada por el calor (ZAT) [12].

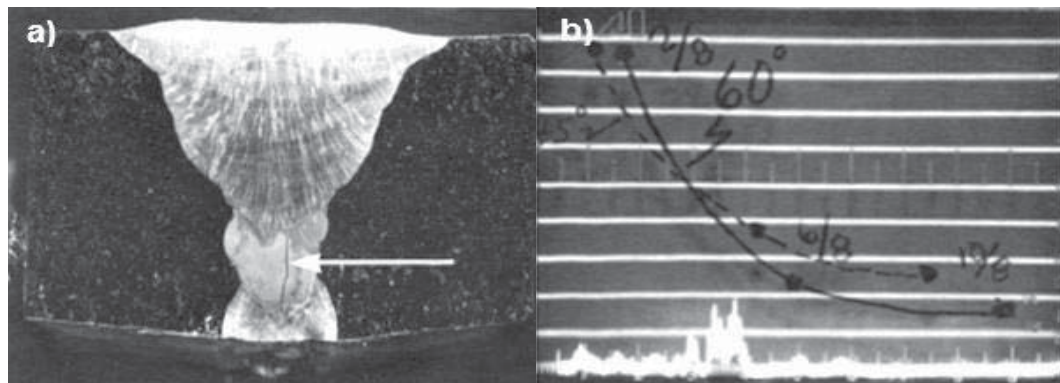


Figura 2.3 a) Configuración típica de una grieta dentro de la soldadura en el material de aporte, b) forma de la señal en A-Scan de una grieta.

2.3.2 Falta de fusión lateral

La fusión incompleta o falta de fusión lateral resulta cuando el metal base o el material de aporte en la soldadura no se eleva hasta el punto de fusión, en el punto de fusión del depósito de soldadura. El no retirar la escoria, cascarilla de laminación, óxidos, o cualquier otro material extraño a la aleación de metal de las superficies de la junta de soldadura también puede evitar que el metal se deposite completamente en la unión [12].

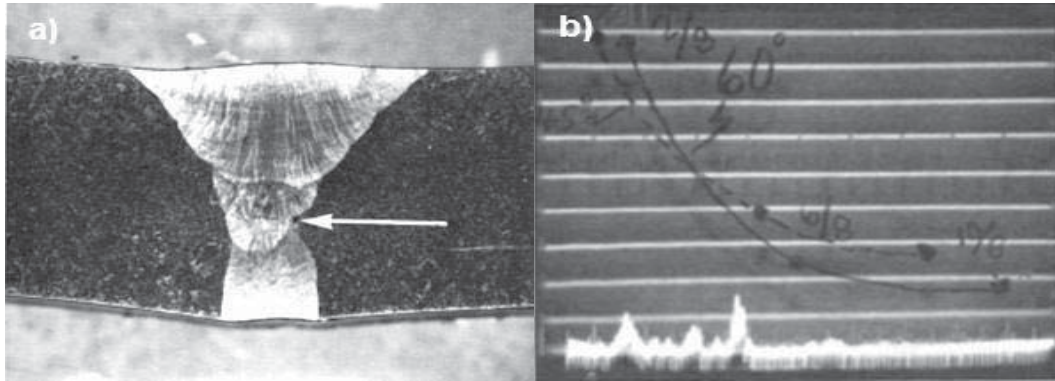


Figura 2.4 a) Macrografía que muestra un defecto dentro de la soldadura por fusión incompleta, b) señal A-Scan del defecto por fusión incompleta.

2.3.3 Porosidad.

La porosidad se refiere a gas atrapado debido a una elevada velocidad de solidificación que se encuentran frecuentemente en las soldaduras. La porosidad puede venir de los gases liberados por el metal de soldadura, debido a la solubilidad reducida por la temperatura baja, y de los gases formados por reacciones químicas en la soldadura. La porosidad se puede encontrar en muchas áreas; pueden estar dispersa a lo largo de la soldadura, que se encuentre sólo en la raíz, o aislada en un área específica. La mayoría de las soldaduras contienen alguna cantidad de porosidad de diferentes tamaños [12].

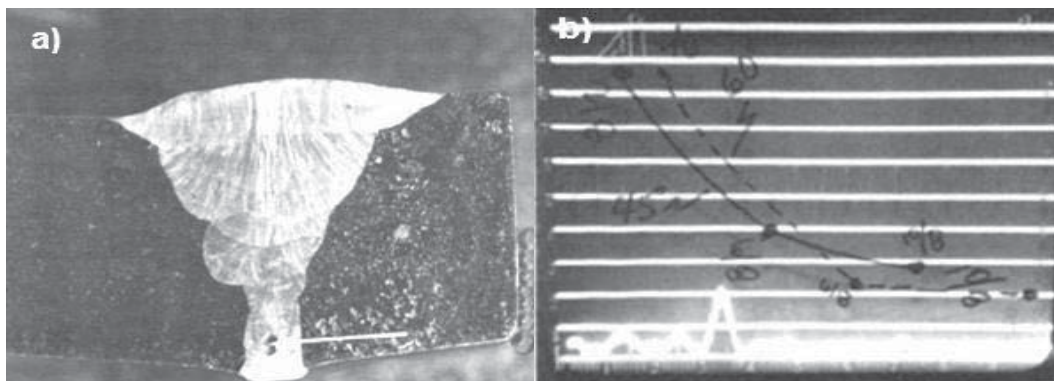


Figura 2.5 a) Macrografía y b) Señal Ultrasónica en Forma A-Scan de la Porosidad.

2.3.4 Escoria atrapada

Las inclusiones de escoria se describen como óxidos y otros materiales no metálicos sólidos que quedan atrapadas en el metal de soldadura o entre la soldadura y el metal base. Por lo general son creados por los fundentes empleados en las operaciones de soldadura por arco. En las operaciones de soldadura de capas múltiples, no retirar la escoria entre pasadas puede dar lugar a inclusiones de escoria en estas zonas. Las inclusiones de escoria son generalmente lineales y pueden ocurrir ya sea como partículas cortas o como bandas largas. La mayoría de las inclusiones de escoria pueden ser evitadas por la preparación apropiada de la junta antes de que cada cordón se deposite [12].

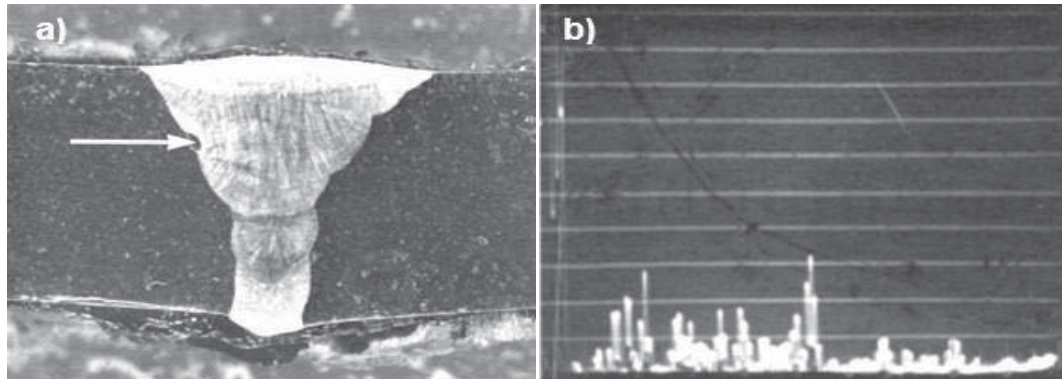


Figura 2.6 a) macrografía que muestra una inclusión de escoria dentro de la soldadura b) señal de ultrasonido característica de una inclusión de escoria en A-Scan.

2.4 ¿Qué es el ultrasonido?

El sonido es energía que se desplaza en un movimiento ondulatorio y que tiene, entre otras, las siguientes características:

- Amplitud
- Frecuencia
- Velocidad

Además, al ser energía, el sonido puede realizar un trabajo y modificar, dentro de ciertos parámetros, el estado original de la materia con la que interactúa.

El sonido tiene las siguientes características generales de comportamiento:

- Se desplaza más rápidamente en los sólidos y en los líquidos que en los gases.
- La temperatura influye en su velocidad de transmisión; ya que por cada grado centígrado que aumenta la temperatura del aire, la velocidad del sonido se incrementan en 61 cm/s
- Puede desplazarse en varios tipos o modos de ondas, que se describirán más adelante en este mismo tema.

Tabla 2.1 El espectro de ondas acústicas en tres zonas con base en su rango de frecuencia.

ZONA	RANGO DE FRECUENCIA (Hz)
Infrasónica	1 a 16 Hz
Sónica o audible	16 Hz a 20 KHz
Ultrasónica	Más de 20 KHz

El ultrasonido es una vibración mecánica producto de la onda acústica que:

- Trabaja en una frecuencia o rango mayor a la que el oído humano puede percibir.
- Viaja a través de un medio físico elástico como metal, plástico, concreto, etc.
- Es posible emitirla, orientarla, registrarla y medirla con aparatos.

El rango de frecuencias con el que el ultrasonido trabaja es lo que le da el nombre a esta zona. El ultrasonido industrial trabaja con frecuencias que oscilan entre los 0.5 MHz y los 25 MHz. El ultrasonido se genera de varias formas; pero la que interesa para este texto es la que consiste en que un oscilador mecánico, que es un cristal piezoeléctrico, transmite las vibraciones que genera cuando se le aplica una corriente eléctrica al objeto que se inspecciona [13].

2.5 Tipos o modos de ondas del ultrasonido

2.5.1 Ondas longitudinales o de compresión

Las ondas longitudinales o de compresión son aquellas en las que las partículas del material vibran paralelamente a la dirección en que el ultrasonido se propaga. Esto genera zonas de compresión y dilatación (rarefacción) separadas entre sí media longitud de onda dentro del material en el que se propagan (ver Figura 2.7) [13].

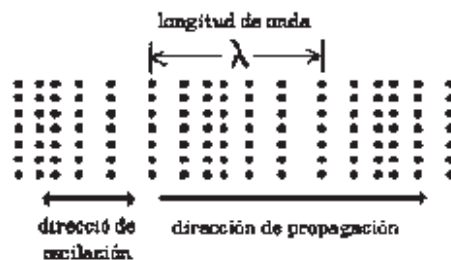


Figura 2.7 Ondas Longitudinales o de Compresión.

Las ondas longitudinales o de compresión:

- Viajan a una velocidad mayor que los otros tipos de ondas.
- Manifiestan una velocidad longitudinal o compresiva.
- Pueden transmitirse a través de sólidos, líquidos y gases.

Las ondas longitudinales se emplean en:

- La medición de espesores de los materiales.
- La detección y evaluación de discontinuidades.

Las ondas longitudinales o de compresión también sirven para generar otras ondas de diferente tipo a partir de:

- Un ángulo de incidencia diferente al normal.
- La geometría del material sujeto a inspección.

2.5.2 Ondas transversales o de corte

Las ondas transversales o de corte son aquellas en las que las partículas del material vibran transversalmente a la dirección en que el ultrasonido se propaga como se observa en la Figura 2.8. [13].



Figura 2.8 Ondas Transversales o de Corte.

Las ondas transversales o de corte:

- Viajan aproximadamente a la mitad de la velocidad de una onda longitudinal cuando se desplazan en el mismo material.
- Manifiestan una velocidad transversal o cortante.
- Casi no pueden transmitirse a través de los líquidos y los gases porque las moléculas de estos ofrecen poca resistencia al desplazamiento transversal; y por lo tanto, no existen vínculos elásticos que las ligen a su posición 0.
- Tienen longitudes de ondas más cortas que las ondas longitudinales de la misma frecuencia; por lo que son más sensibles a los reflectores pequeños.

Las ondas transversales o de corte se usan principalmente para:

- Inspeccionar uniones soldadas.
- Detectar y evaluar discontinuidades en piezas forjadas, laminadas o fundidas.

2.5.3 Ondas superficiales o de Rayleigh

Las ondas superficiales o de Rayleigh son aquellas que se desplazan sobre la superficie del material y penetran a una profundidad máxima de una longitud de onda (ver Figura 2.9).

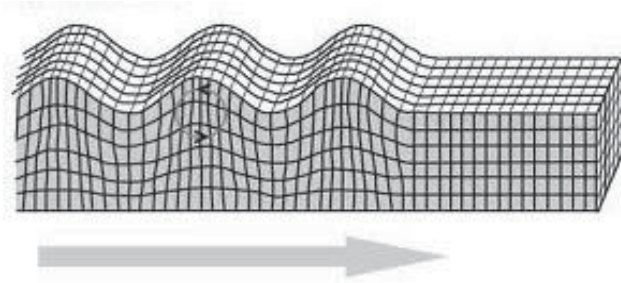


Figura 2.9 Ondas Superficiales o de Rayleigh.

Las ondas superficiales o de Rayleigh:

- Viajan a una velocidad del 90% de la velocidad de una onda transversal o de corte.
- Manifiestan una velocidad superficial.
- Tienen una trayectoria elíptica.
- Son muy sensibles y se atenúan cuando existen un segundo medio en su trayectoria; por ejemplo, un líquido o un sólido en contacto con la superficie del material que se inspecciona.[13]

Las ondas superficiales o de Rayleigh se usan para detectar discontinuidades en superficies poco rugosas.

2.5.4 Ondas de placa o de Lamb

Las ondas de placa o de Lamb son aquellas que se generan cuando un material muy delgado se somete a una onda superficial o de Rayleigh. Las ondas de placa o de Lamb se clasifican en:

- Ondas simétricas o de dilatación.
- Ondas asimétricas o de flexión.

Las ondas de placa o de Lamb no son una constante del material y, en consecuencia, su velocidad depende:

- Del espesor del material.
- Del ángulo de incidencia.
- Del tipo o modo de la onda (longitudinal, transversal o superficial).

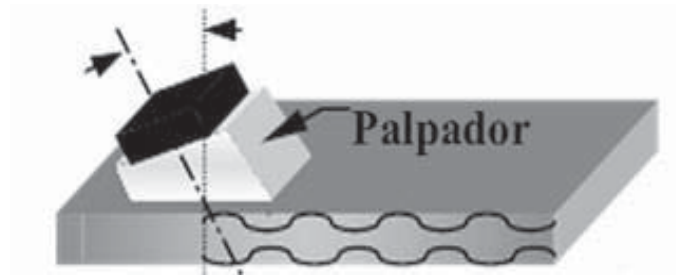


Figura 2.10 ondas de placa o de lamb.

Las ondas de placa o de Lamb se usan para inspeccionar materiales muy delgadas.

2.6 Método de Pulso-Eco

Método de pulso y eco, o de reflexión, se genera un pulso ultrasónico que es transmitido a través del material. Cuando la onda elástica choca con una interface, parte de la onda se refleja, regresando al transductor. En un osciloscopio es posible desplegar tanto el pulso inicial como el reflejado. Del despliegue, se mide el tiempo requerido para el viaje de ida y vuelta, con lo que se puede calcular la distancia a la que se encuentra la interface. De no existir fallas en el material, el haz se reflejará desde su lado opuesto y la distancia será dos veces el espesor de la pared, mientras que moviendo el transductor sobre la superficie, podemos conocer, también la longitud de la discontinuidad. Este método de transmisión de un pulso a través del medio, se genera en un transductor de pulsos ultrasónicos y mediante un segundo transductor se detecta en la superficie opuesta [14].

Por lo general como este método es el más utilizado para medir tiempo de recorrido, se utiliza básicamente para problemas de defectología, caracterización y metrología de los materiales. Los componentes que conforman un sistema ultrasónico diseñado para el uso

del método del pulso-eco son los siguientes: un reloj electrónico, un generador de señales eléctricas, un pulsador, un transductor transmisor, transductor- receptor y un amplificador de señales.

2.7 Cálculo de las velocidades de propagación del sonido en un material

2.7.1 Módulo de Elasticidad

El modulo de elasticidad es la constante de proporción entre el esfuerzo de tracción o compresión y la deformación unitaria experimentada por el material. Este módulo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

Donde:

E = Modulo de elasticidad.

σ = Esfuerzo de tracción o compresión.

ε = Deformación unitaria.

2.7.2 Módulo de Corte

El modulo de corte es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo de corte y la deformación unitaria experimentada por el material. Este módulo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.3)$$

Donde:

G = Módulo de corte.

τ = Esfuerzo de corte.

γ = Deformación de corte unitaria.

2.7.3 Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson es la relación negativa entre la deformación perpendicular y paralela a la dirección de aplicación del esfuerzo. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (2.4)$$

Donde:

μ = Coeficiente de Poisson.

ε_1 = Deformación unitaria en la dirección paralela al esfuerzo.

ε_2 = Deformación unitaria en la dirección perpendicular al esfuerzo.

2.8 Relaciones entre las velocidades de propagación del sonido y las propiedades mecánicas de un material

Las distintas velocidades de propagación del sonido dependen del tipo de onda y son:

- Velocidad compresiva (C_L).

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C_L = \left[\left(\frac{E}{\rho} \right) * \frac{(1-\mu)}{(1+\mu) \times (1-2\mu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

- Velocidad transversal o cortante (C_T).

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C_T = \left[\left(\frac{E}{\rho} \right) * \left(\frac{1}{2(1+\mu)} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

- Velocidad superficial (C_S).

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C_S = \left(\frac{0.87+1.12\mu}{1+\mu} \right) * \left[\left(\frac{E}{\rho} \right) * \left(\frac{1}{2(1+\mu)} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

2.9 Relaciones entre velocidades de propagación del sonido

Las diferentes velocidades de propagación del ultrasonido se relacionan entre sí y con las propiedades físicas de los materiales. La relación entre las ondas longitudinales y las ondas transversales es:

$$C_T = C_L \sqrt{\frac{(1-2\mu)}{(1-\mu)}} \quad (2.8)$$

La relación entre las ondas transversales y las ondas superficiales es:

$$C_S = C_T \frac{0.87 + (1.12 * \mu)}{1 + \mu} \quad (2.9)$$

En todos los materiales sólidos la relación de las velocidades longitudinal y transversal fluctúa entre 0 y 0.7. La velocidad de las ondas transversales o de corte es aproximadamente la mitad de la velocidad de las ondas longitudinales o de compresión. La velocidad de las ondas superficiales o de Rayleigh es el 0.9 de la velocidad de las ondas transversales [15].

2.10 Impedancia acústica

La impedancia acústica es la resistencia que un material opone a las vibraciones mecánicas de las ondas ultrasónicas y el producto de la velocidad máxima de vibración de una onda en un material multiplicada por la densidad de este. La impedancia acústica se representa con la letra **Z**. La impedancia acústica (**Z**) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Z = \rho * C_m \quad (2.10)$$

Donde:

Z = impedancia acústica (Kg/m²s).

ρ = densidad del material transmisor (Kg/m).

C_m = velocidad máxima de vibración en el material (m/s).

Tabla 2.2 Impedancia Acústica según el Medio Elástico.

Medio Elástico	Impedancia acústica (Z)
Gaseoso	Baja
Líquido	Media
Sólido	alta

2.11 Presión acústica

La presión acústica es la fuerza por unidad de superficie normal al frente de la onda, si se trata de ondas longitudinales o de compresión, es también la fuerza cortante por unidad de superficie paralela al frente de la onda, si se trata de ondas transversales o de corte. La presión acústica se representa con la letra **P** [8].

La presión acústica (P) se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$P = Z * C_m \quad (2.11)$$

$$P = Z\omega A \quad (2.12)$$

$$P = \rho C_m \omega A \quad (2.13)$$

Donde:

P = Presión acústica.

Z = Impedancia acústica.

ω = Frecuencia angular = $2\pi f$.

A = Área

ρ = Densidad del material transmisor.

C_m = Velocidad máxima de vibración en el material.

2.12 Energía Acústica específica

La energía acústica específica es la energía presente en la unidad de volumen del medio que avanza con la velocidad acústica. La energía acústica específica se representa con la expresión E_e . La energía acústica específica de las ondas planas y esféricas se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_e = \frac{1}{2} (\rho C_m^2) \quad (2.14)$$

$$E_e = \frac{1}{2} (\rho \omega^2 A^2) \quad (2.15)$$

$$E_e = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho^2}{ZC} \right) \quad (2.16)$$

Donde:

E_e = Energía acústica específica.

ρ = Densidad del material transmisor (kg/m).

ω = Frecuencia angular = $2\pi f$.

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

A = Área.

Z = Impedância acústica.

C = Velocidad de transmisión del sonido.

2.13 Intensidad acústica

La intensidad acústica es la cantidad de energía que pasa por una unidad de área durante una unidad de tiempo. Es el producto de la energía acústica específica y de las velocidades de propagación del sonido. La intensidad acústica se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$I_A = \frac{1}{2} (Z C_m^2) \quad (2.17)$$

$$I_A = \frac{1}{2} (Z \omega A^2) \quad (2.18)$$

$$I_A = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho^2}{Z} \right) \quad (2.19)$$

Donde:

I_A = Intensidad acústica.

ρ = Densidad (kg/m).

ω = Frecuencia angular = $2\pi f$.

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

A = Área.

Z = Impedância acústica.

2.14 Incidencia perpendicular o normal

La incidencia perpendicular o normal es la forma en que se propaga una onda ultrasónica que incide sobre una superficie plana y uniforme y se proyecta en un ángulo de 90 respecto a la superficie de contacto del palpador o la pieza de prueba. Cuando la onda incide en la interfaz de dos medios, una parte de la energía de la onda se refleja y la otra se transmite en el segundo medio, al tiempo que mantiene su dirección y sentido.

2.14.1 Coeficientes de reflexión y de transmisión

Al incidir sobre la superficie, una parte de la energía de esta onda se refleja y vuelve en la misma dirección de la onda incidente, mientras que la otra parte se propaga en el segundo medio, al mismo tiempo que mantiene su dirección y su sentido. Los parámetros de la incidencia perpendicular se relacionan por medio de los coeficientes de reflexión (**R**) y de transmisión (**T**):

$$\text{Coeficiente de reflexión (R): } R = \frac{I_R}{I_I} \quad (2.20)$$

$$\text{Coeficiente de transmisión (T): } T = \frac{I_T}{I_I} \quad (2.21)$$

Donde: I_R = Intensidad de Reflexión, I_T = Intensidad de Transmisión y I_I =Intensidad de Incidencia

Cuando el ángulo de incidencia es perpendicular, la energía reflejada y la energía transmitida se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Energía reflejada: } \%R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} 100 \quad (2.22)$$

$$\text{Energía transmitida: } \%T = \frac{(Z_1 * Z_2)}{(Z_1 + Z_2)^2} 100 \quad (2.23)$$

Los resultados de ambos cálculos es un porcentaje respecto de la intensidad de la energía incidente. Es decir, son valores adimensionales. El balance de energía incidente es igual a la suma de la energía reflejada y la energía transmitida. Se expresa mediante las siguientes ecuaciones: $I_I = I_R + I_T$ y por consiguiente: $R + T = 1$

Las ecuaciones para ondas longitudinales también son validas para cálculos con ondas transversales o de corte.

Transmisión optima de ondas: el porcentaje de energía transmitida de la onda incidente en una interfaz acústica depende de la relación de impedancias Z_1/Z_2 de los medios. Para obtener una transmisión de ondas ultrasónicas del 100%, la relación óptima de impedancia es 1:1. Esto no es posible en la práctica; pero se debe procurar obtener valores cercanos entre sí.

2.15 Incidencia angular y conversión de modo

La incidencia angular es la forma oblicua o inclinada en que una onda ultrasónica longitudinal incide con la interfaz acústica. Debido a la diferencia en la velocidad de

transmisión y de la impedancia acústica entre los distintos materiales, parte de la energía de la onda ultrasónica se refleja y otra parte se refracta [16].

2.15.1 Refracción y conversión de modo

La incidencia angular es similar a lo que ocurre a un haz luminoso que pasa de un material a otro con diferente índice de refracción que el primero. Sin embargo, las ondas ultrasónicas de cualquier tipo, además de refractarse en el segundo medio, se transforman parcial o totalmente en otros tipos de onda, dependiendo del ángulo de incidencia de la onda ultrasónica y de las velocidades de transmisión. A esto se le conoce como conversión de modo. Puesto que estos tipos de onda tienen diferentes velocidades de propagación en el mismo material, también presentaran distintos ángulos de refracción.

La conversión de modo se origina por las causas siguientes:

- La geometría del material
- La divergencia del haz
- La incidencia angular

2.16 Ley de Snell

2.16.1 Refracción de una onda

Cuando un medio solido refracta una onda ultrasónica, entonces esta se descompone en dos ondas refractadas en el medio refractante:

- Una producida por la velocidad longitudinal de la onda
- Otra producida por la velocidad transversal de la onda ultrasónica en el medio refractante.

2.16.2 Implicaciones de las ondas refractadas

En la mayoría de las ocasiones, para simplificar la inspección de cuerpos sólidos es conveniente eliminar la onda longitudinal y transmitir exclusivamente la onda transversal.

Si los dos tipos de ondas refractadas están presentes al mismo tiempo en el material de inspección, con las técnicas actuales de inspección ultrasónica es casi imposible evaluar acertadamente una discontinuidad, porque no se puede distinguir con que onda se detecto dicha discontinuidad. Por este motivo, el inspector debe asegurarse de que solo exista uno de los tipos o modos de propagación de la onda. Esto se logra al calcular los ángulos críticos de incidencia; porque esta operación permite, al distinguirlos eliminar uno de los tipos o modos de onda a partir de la siguiente hipótesis:

“Si la onda es del tipo longitudinal, entonces su velocidad es mayor y el ángulo de reflexión o de refracción es mayor”. [16]

“Si la onda es del tipo transversal, entonces su velocidad es menor y el ángulo de reflexión o de refracción es menor”.

2.16.3 Ley de reflexión

La ley de reflexión establece que el ángulo de incidencia de una onda ultrasónica es igual al ángulo de reflexión con respecto a la normal al plano de incidencia como lo muestra la Figura 2.12. La ley de reflexión se representa mediante las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \beta \qquad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = 1 \qquad (2.24)$$

Donde:

α = Ángulo de incidencia.

β = Ángulo de reflexión.

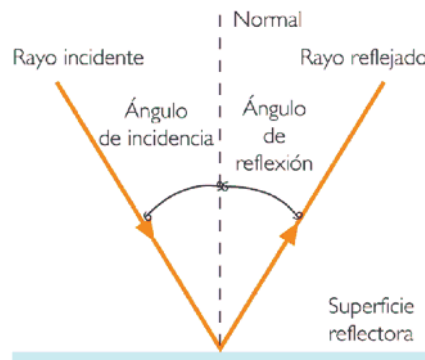


Figura 2.11 Ley de reflexión.

2.16.4 Ley de Snell

La ley de Snell establece que el ángulo de refracción es proporcional al ángulo de incidencia y a la relación de las velocidades de transmisión en los medios de incidente y refractor (ver Figura 2.13). La ley de Snell se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \omega} = \frac{C_1}{C_2} \quad (2.25)$$

Donde:

C_1 = Velocidad del medio 1.

C_2 = Velocidad del medio 2.

α = Ángulo de incidencia.

ω = Ángulo de refracción.

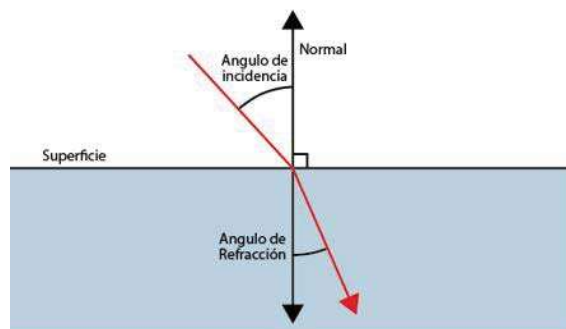


Figura 2.12 Ley de Snell.

2.17 Piezoelectricidad

La piezoelectricidad es un efecto físico reversible que algunos cristales experimentan. Tanto el efecto piezoeléctrico directo como el inverso son proporcionales a la energía eléctrica o a la presión mecánica que se aplica al cristal. La piezoelectricidad puede explicarse fácilmente si se analiza la estructura atómica de un cristal de cuarzo. Esta estructura contiene iones cargados positivamente (átomos de silicio) además de iones cargados negativamente (átomos de oxígeno) como lo muestra la Figura 2.13.

En su estado relajado, el cristal es neutro y no lleva ninguna carga eléctrica sobre sus caras. Sin embargo, al aplicarle una fuerza mecánica al cristal, esta lo deforma y provoca que los iones positivos se aproximen entre sí; en tanto que los iones negativos se separan. Así el cristal queda cargado eléctricamente. Si se hace pasar energía eléctrica a través del cristal, entonces sucede el efecto inverso: los iones positivos (átomos de silicio) se alejan [11].

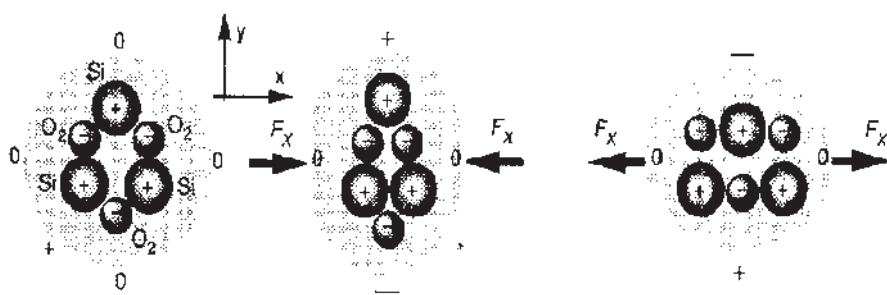


Figura 2.13 Efecto piezoeléctrico.

2.17.1 Materiales piezoeléctricos

Existen distintos materiales piezoeléctricos, que se emplean según las necesidades de la inspección y según las condiciones en que esta se realiza.

Tabla 2.3 Características Físicas de los Materiales Piezoeléctricos más Comunes.

Propiedad	Unidad de medida	Cuarzo	Sulfato de litio	Titanato de bario	Metaniobato de plomo	Zirconato titanato de Pb
Densidad	g/cm ³	2.65	2.06	5.4	6.2	7.5
Velocidad Acústica	10 ⁶ m/s	5.74	5.46	5.10	3.30	4.00
Impedancia Acústica (Z)	10 ⁶ g/m ² s	15.3	11.2	27	20.5	30
Temperatura Crítica	°C	576	130	120	550	190-350
Constante Dieléctrica	Adimensional	4.5	10.3	1000	300	400-4000
Coefficiente de acoplamiento Electromecánico	Adimensional	0.10	0.10	0.45	0.42	0.6-0.7
Módulo Piezoeléctrico	10 ⁻¹² /V	2.3	15	125-190	85	150-593
Constante de Deformación Piezoeléctrica	10 ⁹ V/m	4.9	8.2	1.1-1.6	1.9	1.8-4.6
Constante de Presión piezoeléctrica	10 ³ Vm/N	57	156	14-21	32	20-40

Tabla 2.4 Comportamiento de los materiales piezoeléctricos más comunes durante la inspección ultrasónica.

Material	Eficiencia como transmisor	Eficiencia como receptor	Sensibilidad	Poder de resolución	Características mecánicas
Cuarzo	Mala	Mediana	Escasa	Óptimo	Buena
Sulfato de litio	Mediana	Buena	Buena	Óptimo	Soluble en agua
Titanato de bario	Buena	Mediana	Óptima	mediano	Frágil
Metaniobato de plomo	Buena	Mediana	Óptima	Óptimo	Buena
Zirconato titanato de plomo	Buena	Mediana	Óptima	Mediano	Buena

2.18 Sistema de ultrasonido de arreglo de fases

Un Transductor Ultrasónico Convencional para END comúnmente consta de un solo elemento activo que genera y recibe ondas de alta frecuencia de sonido, o dos pares de elementos, uno para transmitir y otra para recibir. Los Palpadores de Arreglo de Fases, por otra parte, consisten normalmente en un conjunto de transductores desde 16 hasta 256 pequeños elementos individuales que puede cada uno ser pulsadas por separado. Estos pueden estar dispuestos en una tira (arreglo lineal) ver Figura 2.14, matriz 2D, un anillo (matriz anular), una matriz circular (matriz circular), o una forma más compleja. Los palpadores de arreglo de fases pueden ser diseñados para uso en contacto directo, como parte de un conjunto de haz angular con una zapata, o para el uso de inmersión con acoplamiento de sonido a través de una vía de agua [18].

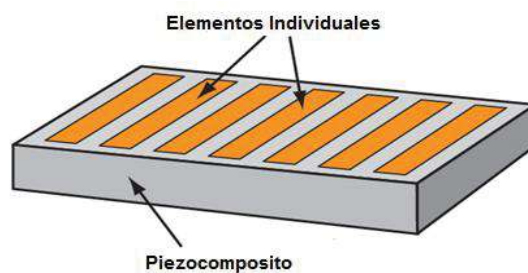


Figura 2.14 Construcción típica Multi-elementos.

2.19 Principio de la eliminación física de la onda

En el sentido más básico, un sistema de Arreglo de Fases utiliza el principio de la eliminación física de la onda. Se varía el tiempo entre una serie de salientes impulsos ultrasónicos, de tal manera que los frentes de onda individuales generados por cada

elemento de la matriz se combinan entre sí. Esta acción agrega o cancela la energía de forma predecible que efectivamente dirige y da forma al haz de sonido. Esto se logra mediante la pulsación de los elementos individuales del palpador en momentos ligeramente diferentes. Con frecuencia, los elementos son pulsadas en grupos de 4 a 32 con el fin de mejorar la sensibilidad efectiva de abertura cada vez mayor, que luego reduce la propagación del haz no deseado y permite un enfoque más nítido [7]. El Software conocido como una calculadora de la ley focal establece tiempos específicos de retardo para disparar de cada grupo de elementos con el fin de generar la forma del haz deseada, teniendo en cuenta las características del palpador y zapata, así como las propiedades de la geometría y acústicas del material ensayado. La secuencia de pulsos programado seleccionado por el software operativo del instrumento luego lanza una serie de frentes de onda individuales del material de ensayo. Estos frentes de onda, a su vez, se combinan constructiva y destructivamente en un frente de onda principal y único que viaja a través del material de ensayo y se refleja en las grietas, discontinuidades, paredes traseras y las fronteras de otros materiales, como una onda ultrasónica convencional [19]. (Ver Figura 2.15).

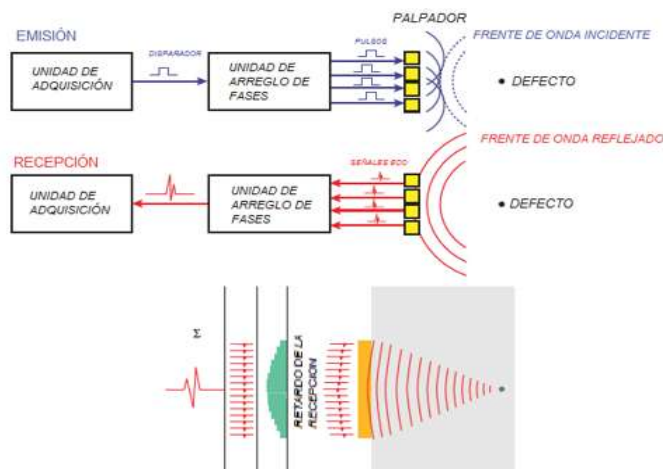


Figura 2.15 Formación del Haz y Tiempo de Retardo para Pulsado y Recepción Múltiple de Haces (Fase y Amplitud)

Los ecos de retorno son recibidos por los diversos elementos o grupos de elementos y desplazado en el tiempo como sea necesario para compensar retardos variables de zapata y luego se suman. A diferencia de un transductor de elemento único convencional, que combina eficazmente los efectos de todos los componentes del haz que golpean su área, un

palpador de arreglo de fases puede ordenar espacialmente el frente de onda de retorno de acuerdo con la hora de llegada y amplitud en cada elemento. Cuando se procesa por el software del instrumento, cada regreso de la ley focal representa la reflexión de un componente particular angular del haz, un punto particular a lo largo de una trayectoria lineal, y / o una reflexión desde una profundidad focal particular.

2.20 Ventajas del arreglo de fases en comparación con el ultrasonido convencional

Los sistemas ultrasónicos de Arreglo de Fases potencialmente pueden ser empleados en casi cualquier prueba donde los detectores de defectos por ultrasonidos convencionales han sido utilizados tradicionalmente. Inspección de soldaduras y detección de grietas 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, vaseado de metal y proveedores de artículos tubulares, construcción y mantenimiento de tuberías, metales estructurales y manufactura en general. El Arreglo de Fases también puede ser usado efectivamente para perfil de espesor de pared restante en aplicaciones de inspección de corrosión [20].

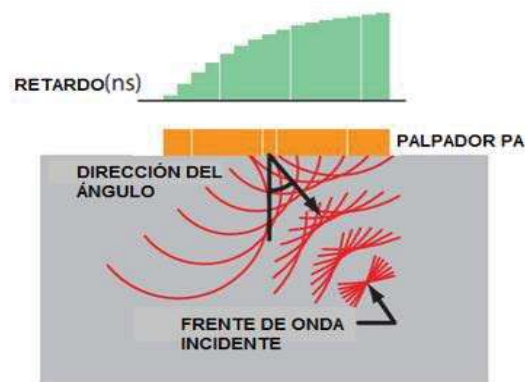


Figura 2.16 Haz Angular Generado por un Palpador Plano por Medio de Retardo Variable.

Los beneficios de la tecnología de Arreglo de Fases sobre el Ultrasonido Convencional provienen de su capacidad de utilizar múltiples elementos para dirigir, enfocar y analizar los haces con un conjunto de sonda única. Orientación de haz, comúnmente conocida como S-exploración (Escaneo Sectorial), se puede usar para componentes de mapeo en ángulos apropiados. Esto puede simplificar la inspección de componentes de geometría compleja.

La capacidad de probar soldaduras con ángulos múltiples con un solo palpador aumenta en gran medida la probabilidad de detección de anomalías.

Las desventajas potenciales de sistema de Arreglo de Fases son un costo algo más elevado y requerimientos para la formación de los operarios. Sin embargo, estos costos se compensan con frecuencia por su mayor flexibilidad y una reducción en el tiempo necesario para llevar a cabo una inspección dada.

2.21 Transductores de arreglo de fases

2.21.1 Características del haz ultrasónico

Un transductor ultrasónico convencional de onda longitudinal trabaja como un pistón fuente de vibraciones mecánicas de alta frecuencia u ondas de sonido. Como se aplica voltaje, el elemento transductor piezoeléctrico (a menudo llamado un cristal) se deforma por compresión en la dirección perpendicular a su cara. Cuando la tensión se elimina, típicamente menos de un microsegundo más tarde, los resortes del elemento trasero, generan el impulso de energía mecánica que comprende una onda ultrasónica (véase la Figura 2.18). Igualmente, si el elemento se comprime por la presión de una onda ultrasónica de llegada, genera un voltaje a través de sus caras. Así, un elemento piezoeléctrico solo puede actuar como un transmisor y receptor de pulsos de ultrasonido [11].

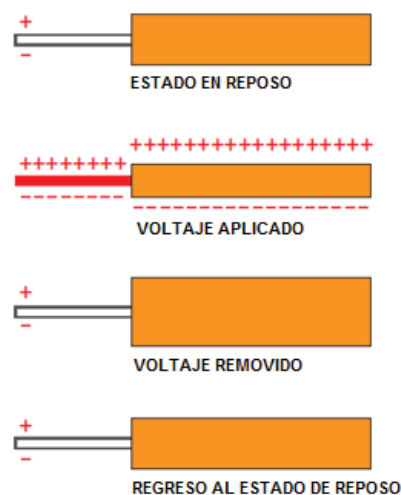


Figura 2.17 Principio del Elemento transductor Piezoeléctrico.

Todos los transductores del tipo más comúnmente usados para END ultrasónicos tienen las siguientes propiedades funcionales fundamentales:

Tipo: el transductor se identifica de acuerdo a la función como: de contacto, línea de retardo, el ángulo del haz, o del tipo de inmersión. Características del material inspeccionado (por ejemplo una rugosidad de la superficie, la temperatura, su accesibilidad así como la posición de un defecto en el material, y la velocidad de inspección), influyen en la selección del tipo de transductor.

Tamaño: el diámetro o la longitud y ancho del elemento transductor activo, el cual se aloja normalmente en un casco un poco más grande.

Frecuencia: el número de ciclos de onda completados en un segundo, expresada normalmente en Kiloherztz (KHz) o Megahertz (MHz). La mayoría de las pruebas ultrasónicas industrial se realiza en la gama de 500 MHz a 20 KHz de frecuencia.

Ancho de banda: La parte de la respuesta de frecuencia que cae dentro de los límites especificados de amplitud. En este contexto, hay que señalar que el transductor de END típico no genera ondas de sonido a una frecuencia pura sola, sino más bien sobre un rango de frecuencias centradas en la designación de frecuencia nominal. El estándar de la industria es especificar este ancho de banda en el punto de -6 dB (o amplitud media).

Sensibilidad: La relación entre la amplitud del pulso de excitación y la del eco recibido de un objetivo designado.

Perfil del haz: El campo de sonido de un transductor está dividido en dos zonas: el campo cercano y el campo lejano como lo muestra la Figura 2.18. El campo cercano es la región cerca del transductor, donde la presión de sonido pasa por una serie de máximos y mínimos, y termina el último en el eje a una distancia máxima N desde la cara. La distancia del campo cercano N representa el foco natural del transductor.

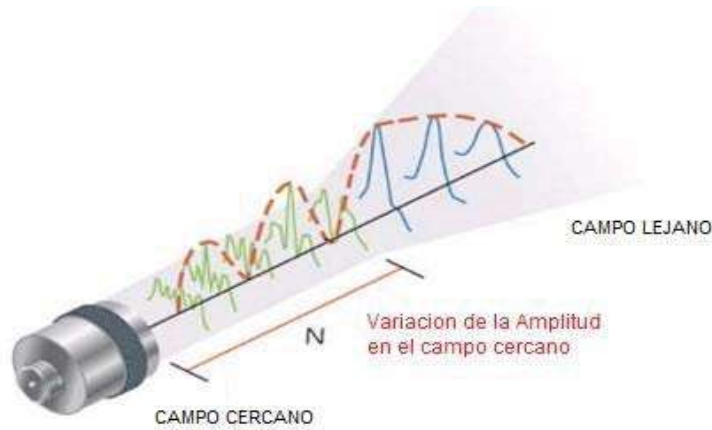


Figura 2.18 Campo de Sonido de un Transductor.

El campo lejano es la región más allá de N , donde la presión del sonido cae gradualmente a cero cuando el diámetro del haz se expande y disipa su energía. La distancia de campo cercano es una función de la frecuencia del transductor y del tamaño del elemento, y la velocidad del sonido en el medio de pieza de prueba y puede ser calculado para los elementos cuadrados o rectangulares comúnmente encontrados en las pruebas de arreglo de fases como a continuación:

$$N = \frac{kL^2 f}{4c} , \quad N = \frac{kL^2}{4\lambda} \quad (2.26)$$

Donde:

N = Longitud de campo cercano.

k = Constante de relación de aspecto.

L = Longitud del elemento o la abertura.

f = Frecuencia.

c = Velocidad del sonido en el material de ensayo.

λ = Longitud de onda = c / f .

La constante de relación de aspecto es como se muestra en la Tabla 2.5. Se basa en la relación entre las dimensiones corta y larga del elemento o la abertura [21].

Tabla 2.5 Constante de relación de aspecto.

Relación corto/largo	k
1.0	1.37 (elemento cuadrado)
0.9	1.25
0.8	1.15
0.7	1.09
0.6	1.04
0.5	1.01
0.4	1.00
0.3 y por debajo	0.99

En el caso de elementos circulares, k no se utiliza y el diámetro del elemento (D) se utiliza en lugar del término longitud:

$$N = \frac{D^2 f}{4c} \quad , \quad N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (2.27)$$

Debido a las variaciones de presión de sonido dentro del campo cercano, puede ser difícil de evaluar con precisión los defectos utilizando técnicas basadas en la amplitud (aunque el espesor calibrado en el campo cercano no es un problema). Adicionalmente, N representa la distancia máxima a la que puede ser un transductor de haz enfocado por medio de cualquiera de una lente acústica o técnicas de fase.

2.22 Propiedades fundamentales de la onda de sonido

Formación del Frente de Onda: Mientras que un transductor de elemento único puede ser pensado como una fuente de pistón, en uno de arreglo de fases, la onda que genera puede modelarse matemáticamente como la suma de las ondas de un gran número de fuentes puntuales. Esto se deriva del principio de Huygens, que indica que cada punto de un frente de onda de avance puede ser considerada como una fuente puntual que lanza una onda esférica nueva, y que el frente de onda unificado resultante es la suma de todas estas ondas esféricas individuales [22].

Dispersión del haz: En principio, la onda sonora generada por un transductor se desplaza en línea recta hasta que encuentra un límite material. Pero si la longitud de la trayectoria del sonido es mayor que la distancia de campo cercano, el rayo también aumenta de diámetro, divergentes como el haz de un reflector tal y como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.19.

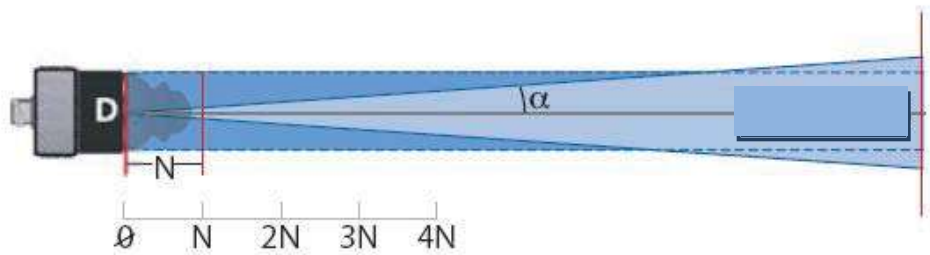


Figura 2.19 Propagación del Haz.

Atenuación: A medida que viaja a través de un medio, el frente de onda organizada generada por un transductor ultrasónico comienza a distorsionarse debido a una transmisión imperfecta de energía a través de la microestructura de cualquier material. Este proceso se conoce como atenuación del sonido. La teoría matemática de la atenuación y la dispersión es compleja. La pérdida de amplitud debido a la atenuación de sonido a través de un camino dado es la suma de los efectos de absorción y los efectos de dispersión. La absorción aumenta de forma lineal con la frecuencia, mientras que la dispersión varía a través de tres zonas en función de la relación de longitud de onda a los límites del tamaño de grano u otros dispersores. En todos los casos, los efectos de dispersión aumentan con la frecuencia. Para un material dado a una temperatura dada, probado a una frecuencia dada, existe coeficiente de atenuación específica, comúnmente expresado en Nepers por centímetro (NP/cm). Una vez que este coeficiente de atenuación es conocido, las pérdidas a través de una ruta de sonido determinado pueden calcularse según la ecuación:

$$p = P_0 e^{-\alpha d} \quad (2.28)$$

Donde:

p = Presión de sonido en el extremo de la trayectoria

P_0 = Presión de sonido al inicio del camino

e = Base de los logaritmos naturales
 a = Coeficiente de atenuación
 d = Longitud del trayecto del sonido.

2.22.1 Características de un palpador de arreglo de fases

Mientras los palpadores de arreglo de fases vienen en una amplia gama de tamaños, formas, frecuencias y el número de elementos, lo que todos tienen en común es un elemento piezoeléctrico que se ha dividido en un número de segmentos. Los palpadores de arreglo de fases para aplicaciones industriales de END se construyen típicamente alrededor de los materiales piezocompuestos, que se componen de muchas barras pequeñas y delgadas de cerámica piezoeléctrica embebidas en una matriz de polímero. Los palpadores compuestos se caracterizan por ofrecer de 10 dB a 30 dB de ventaja de sensibilidad sobre los palpadores piezocerámicos diseños de modo similar. El chapado metálico segmentado se utiliza para dividir la tira de material compuesto en un cierto número de elementos eléctricamente separados que pueden ser pulsadas individualmente. Este elemento segmentado se incorpora entonces a un conjunto palpador que incluye una capa de adaptación de protección, un respaldo, conexiones de cables, y una carcasa como se muestra en la Figura 2.20 [24].

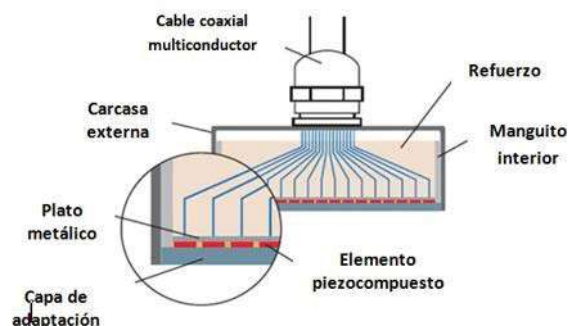


Figura 2.20 Corte-sección del Palpador de Arreglo de Fases.

Los palpadores de Arreglo de Fases están funcionalmente clasificados de acuerdo con los siguientes parámetros básicos:

Tipo: la mayor parte de los palpadores de arreglo de fases son del tipo de haz angular, diseñado para su uso con una zapata de plástico o un zapata recta (zapata de grado cero), o línea de retardo. De contacto directo y palpadores de inmersión.

Frecuencia: la mayor parte de la detección de defectos por ultrasonido se hace entre 2 MHz y 10 MHz, así la mayoría de palpadores de arreglo de fases caen dentro de ese rango.

Número de elementos: los palpadores de arreglo de fases con mayor frecuencia tienen de 16 a 128 elementos, teniendo algunos hasta 256. Un número mayor de elementos aumenta el enfoque y la capacidad de dirección, lo que también aumenta son la cobertura, pero tanto el palpador y los costos de instrumentación también se incrementan.

Tamaño de los elementos: cuando el ancho del elemento se hace más pequeño, aumenta la capacidad de direccionamiento del haz, pero la cobertura de áreas grandes requiere más elementos de mayor costo. Los parámetros dimensionales de un palpador de arreglo de fases comúnmente se definen como lo muestra la Figura 2.21.

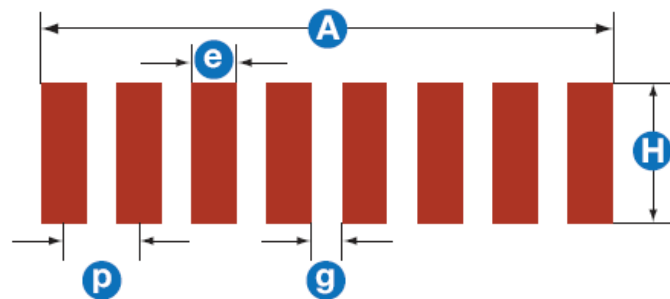


Figura 2.21 Parámetros dimensionales de un palpador de arreglo de fases.

Donde:

A = Abertura total en la dirección de la dirección activa.

H = Elemento de altura o elevación. Dado que esta dimensión es fija, se refiere a menudo como el plano pasivo.

p = Paso, o la distancia de centro a centro entre dos elementos sucesivos.

e = Anchura de un elemento individual.

g = Espaciado entre elementos activos.

Esta información es utilizada por el software del instrumento para generar la forma del haz deseado. Si no se introduce automáticamente por el software de reconocimiento del palpador, entonces debe ser introducida por el usuario durante la instalación.

2.23 Zapatas de arreglo de fases

Un conjunto de palpadores de arreglo de fases suele incluir una zapata de plástico. Las zapatas se utilizan tanto en aplicaciones de la onda de corte y de ondas longitudinales, incluidas los escaneos de haz lineal recto. Estas zapatas realizan básicamente la misma función en el sistema de arreglo de fases como en la detección convencional de defectos con un único elemento, el acoplamiento de la energía de sonido del palpador a la pieza de ensayo de tal manera que se convierte de modo y / o refracta en un ángulo deseado de acuerdo con la ley de Snell. Mientras que los sistemas de arreglo de fases realizan el uso de orientación de haz para crear haces en ángulos múltiples desde una sola zapata, este efecto de refracción es también parte del proceso de generación del haz. Las zapatas de onda transversal parecen muy similares a aquéllas usadas con los transductores convencionales, algunas de ellas se muestran en la Figura 2.22.



Figura 2.22 Zapatas para Palpador de Arreglo de Fases.

Las zapatas de grado cero son básicamente bloques de plástico llanos que son usadas para acoplar la energía del sonido y para proteger la cara del palpador de los arañazos o la abrasión en el escaneo lineal directo y en los escaneos angulares de bajos ángulos con onda longitudinal [24].

2.24 Pulsado en fase

Siempre que las ondas procedentes de dos o más fuentes interactúan unos con otros, hay efectos de fase que conducen a un aumento o disminución en la energía de onda en el punto de combinación. Cuando las ondas elásticas de la misma frecuencia satisfacen de tal

manera que sus desplazamientos son precisamente sincronizado (en fase, o cero grados de ángulo de fase), las energías de ondas se suman para crear una onda de amplitud más grande. Si se encuentran de tal manera que sus desplazamientos son exactamente opuesto (180 grados fuera de fase), entonces las energías de ondas se cancelan entre sí (ver Figura 2.23). En ángulos de fase entre 0 grados y 180 grados, hay una serie de etapas intermedias entre la suma total y cancelación completa. Al variar el tiempo de las ondas de un gran número de fuentes, es posible utilizar estos efectos tanto para dirigir como para enfocar el frente de onda combinado resultante. Este es un principio fundamental detrás de la prueba de arreglo de fases.

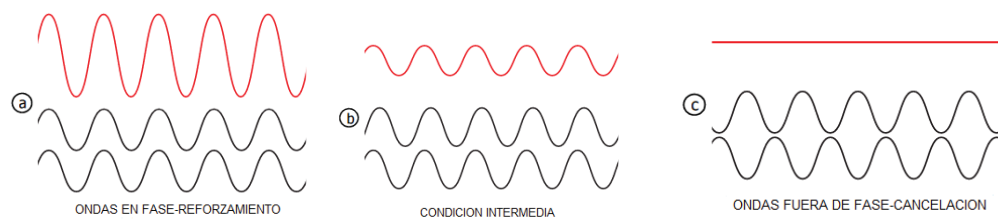


Figura 2.23 Efectos del Desfasamiento: Combinación y Cancelación.

Cuando el frente de onda incide sobre la superficie inferior puede ser visualizado a través de principio de Huygens como una serie de fuentes puntuales. Las ondas teóricamente esféricas de cada uno de estos puntos que interactúan a partir de una única onda en un ángulo determinado por la ley de Snell. En las pruebas de arreglo de fases, los efectos previsibles de refuerzo y cancelación ocasionados por la eliminación gradual se utilizan para dar forma y dirigir el haz ultrasónico. Pulsando elementos individuales o grupos de elementos con retardos diferentes se crea una serie de ondas de fuentes puntuales que se combinan en un único frente de onda que viaja en un ángulo seleccionado. Este efecto electrónico es similar a la demora mecánica generada por una zapata convencional, pero puede ser además dirigido cambiando el patrón de retrasos [25].

A través de la interferencia constructiva, la amplitud de esta onda combinada puede ser considerablemente mayor que la amplitud de cualquiera de las ondas individuales que lo producen. Del mismo modo, retrasos variables se aplican a los ecos recibidos y a cada elemento del arreglo. Los ecos son sumados para representar un solo haz angular y / o componente focal del haz total. Además de alterar la dirección del frente de onda primario,

esta combinación de componentes del haz de haces individuales permite centrarse en cualquier punto en el campo cercano (ver Figura 2.24).

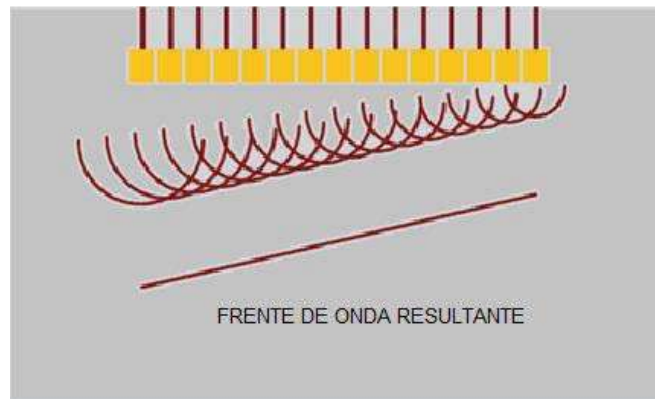


Figura 2.24 Frente de onda angular.

Los elementos son normalmente pulsados en grupos de 4 a 32 con el fin de mejorar la apertura efectiva y aumento de la sensibilidad, que reducen la propagación del haz no deseado y permite más nitidez de enfoque. Los ecos de retorno son recibidos por los diversos elementos o grupos de elementos y desplazado en el tiempo como sea necesario para compensar retardos variables de la zapata y luego se suman. A diferencia de un transductor de elemento único convencional, que combina eficazmente los efectos de todos los componentes del haz que golpean su área, un palpador de arreglo de fase puede ordenar espacialmente el frente de onda de retorno de acuerdo con la hora de llegada y amplitud en cada elemento.

Estos frentes de onda a su vez se combinan de forma constructiva y destructivamente en un frente de onda principal y única que viaja a través del material de ensayo y se refleja en las grietas, discontinuidades, paredes traseras y otros límites materiales como con cualquier onda ultrasónica convencional. El haz puede ser dinámicamente dirigido a través de varios ángulos, la distancia focal y tamaños del punto focal de tal manera que un conjunto de palpadores único es capaz de examinar el material de prueba a través de una serie de perspectivas diferentes.

2.25 Fundamentos de las imágenes de arreglo de fases

Ambos instrumentos ultrasonido convencional y arreglo de fases ultrasónico utilizan ondas de alta frecuencia de sonido para comprobar la estructura interna de la pieza de prueba o medir su espesor. Ambos se basan en las mismas leyes básicas de la física que rigen la propagación de ondas de sonido. Conceptos similares se emplean en ambas tecnologías ultrasónicas para presentar los datos ultrasónicos.

Los instrumentos ultrasónicos convencionales para END comúnmente constan de un solo elemento activo que genera y recibe ondas de alta frecuencia de sonido, o dos pares de elementos, uno para transmitir y otra para recibir. Un instrumento típico consta de un generador de impulsos de un solo canal y un receptor que genera y recibe una señal ultrasónica con un sistema de adquisición digital integrada, que se coordinan con una pantalla de a bordo y el módulo de medición. En las unidades más avanzadas, los múltiples canales de recepción del generador de impulsos se pueden utilizar con un grupo de transductores para aumentar la zona de cobertura para la evaluación de diferentes profundidades u orientaciones de defectos y puede además proporcionar salidas de alarma. En sistemas más avanzados, el ultrasonido convencional puede ser integrado con los codificadores de posición, controladores y software como parte de un sistema de imagen.

Los instrumentos de arreglo de fases, por otra parte, son naturalmente multicanal ya que necesitan para proporcionar patrones de excitación (leyes focales) a palpadores desde 16 hasta 256 elementos. A diferencia de los detectores de defectos convencionales, los sistemas de arreglo de fases pueden barrer un haz de sonido desde un palpador a través de una gama de ángulos refractados, a lo largo de una trayectoria lineal, o dinámicamente enfocados en un número de diferentes profundidades, lo que aumenta la flexibilidad y la capacidad en configuraciones de inspección. Esta capacidad adicional de generación de trayectorias múltiples de sonido dentro de un palpador, añade una gran ventaja en la detección y, naturalmente, añade la posibilidad de visualizar la inspección mediante la creación de una imagen de la zona de inspección. Las imágenes de arreglo de fases proporcionan al usuario la capacidad de ver cambios relativos punto-a-punto y las respuestas multi-angulares de defectos, que puede ayudar en la discriminación de defectos y dimensionamiento.

2.26 Datos de la presentación tipo A (A-Scan)

Todos los instrumentos ultrasónicos suele grabar dos parámetros fundamentales de un eco: Lo grande que es (amplitud) y donde se produce en el tiempo con respecto a un punto cero (pulso de tiempo de tránsito). El tiempo de tránsito, a su vez, generalmente está relacionado con la profundidad del reflector o de distancia, sobre la base de la velocidad del sonido del material de ensayo y la simple relación siguiente:

$$\text{Distancia} = \text{velocidad} * \text{tiempo}$$

La presentación más básica de los datos de la forma de onda de ultrasonido es en la forma de una pantalla de A-Scan, o forma de onda, en la que la amplitud del eco y el tiempo de tránsito son trazados en una cuadrícula sencilla con el eje vertical representa la amplitud y el eje horizontal representa el tiempo. El ejemplo de la Figura 2.25 muestra una versión con una forma de onda rectificada; también se utilizan pantallas RF no rectificado. La barra roja en la pantalla es una puerta que selecciona una parte del tren de ondas para su análisis, típicamente la medición de la amplitud del eco y / o profundidad.

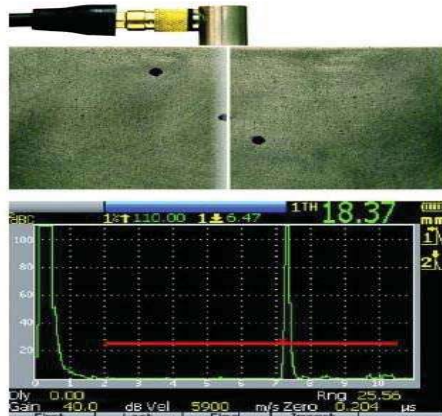


Figura 2.25 Datos del A-Scan.

2.27 Presentación tipo sectorial (S-Scan)

De todos los modos de imagen discutidos hasta ahora, el S-Scan es exclusivo de equipos de arreglo de fases. En una exploración lineal, todas las leyes focales emplean un ángulo fijo con la secuencia de apertura. El S-Scan, por otro lado, utiliza aberturas fijas y se dirige a través de una secuencia de ángulos como lo muestra la Figura 2.26. Dos formas principales

se utilizan típicamente. Los más conocidos, muy común en las imágenes médicas, utiliza una zapata de interfaz de cero grados para dirigir las ondas longitudinales, creando una imagen en forma de pastel que muestra defectos laminares y ligeramente en ángulo.

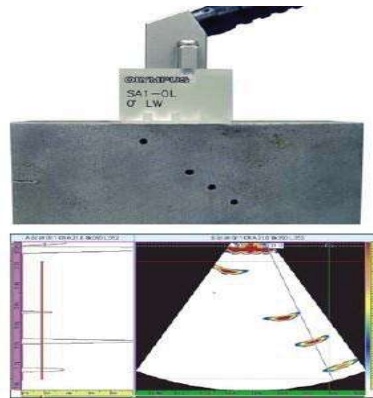


Figura 2.26 -30° a +30° S-Scan.

La generación de la imagen real funciona sobre el mismo principio de apilados A-Scan que se discuten en el contexto de las exploraciones lineales introducidos en la sección anterior. El usuario define el ángulo inicial, final y resolución de paso para generar la imagen S-Scan. se observa que la abertura se mantiene constante, cada ángulo definido genera un haz que corresponde con las características definidas por la abertura, la frecuencia, la amortiguación, y similares. La respuesta de la forma de onda de cada ángulo (leyes focales) se digitaliza en código de colores, y se representa en el ángulo correspondiente apropiado para la construcción de una imagen de corte transversal. En la actualidad el S-Scan se produce en tiempo real a fin de ofrecer continuamente imágenes dinámicas con el movimiento del palpador. Esto es muy útil para la visualización de defectos y aumenta la probabilidad de detección, especialmente con respecto a los defectos orientados al azar, como muchos ángulos de inspección pueden ser utilizados al mismo tiempo.

2.28 Formato de combinación de imagen

Las Imágenes de arreglo de fases son poderosas en su capacidad para proporcionar visualización en tiempo real de los datos volumétricos. Mediante el proceso de barrido electrónico, la formación de imágenes se convierte realmente en tiempo real y se utiliza tanto manualmente como en sistemas automatizados para aumentar la probabilidad de

detección. Especialmente en los instrumentos automatizados de arreglo de fases y con mayor capacidad, la capacidad de mostrar varios tipos de imagen y almacenar la información de forma de onda completa para toda la inspección, permite el análisis de los resultados de la inspección post-escaneado. Debido a que todos los datos de forma de onda ultrasónica se recogen, este análisis posterior permite la reconstrucción de Scan sectoriales, S-Scan, y / o B-Scan con A-Scan correspondiente, con la información en cualquier lugar de inspección. Por ejemplo, la pantalla de la Figura 2.27. Muestra simultáneamente el rectificado A-Scan de forma de onda, una exploración de sector, y plano C-Scan de la imagen del perfil de soldadura.

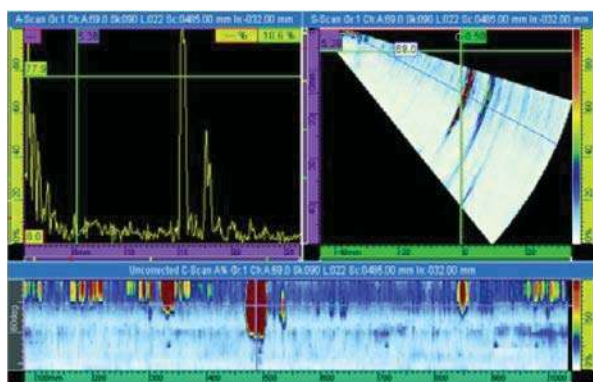


Figura 2.27 Formato de Imagen Múltiple.

2.29 Discusión de trabajos previos.

L. Satyanarayan et al. [26] Llevaron a cabo un estudio de simulación con elemento finito en el dominio del tiempo para imágenes S-Scan obtenidas con ultrasonido con arreglo de fases, esto para la detección de grietas en tuberías grandes, codos y secciones de tuberías en T, como se observa en la figura 2.28. La simulación se realizó con un modelo 2D FDTD, los experimentos fueron realizados para validar los resultados modelados para la simulación de la técnica de pulso-eco y los transductores de arreglo de fases. Las inspecciones se realizaron sobre muestras de la tubería con muescas de diferentes tamaños, se llevaron a cabo con un transductor de 64 elementos piezoeléctricos, una frecuencia de 5 MHz con un arreglo de fases lineal. El modelo se realizó para dos configuraciones: una muesca en la superficie inferior de un espécimen de codo y una en la superficie superior de una muestra de una sección en T.

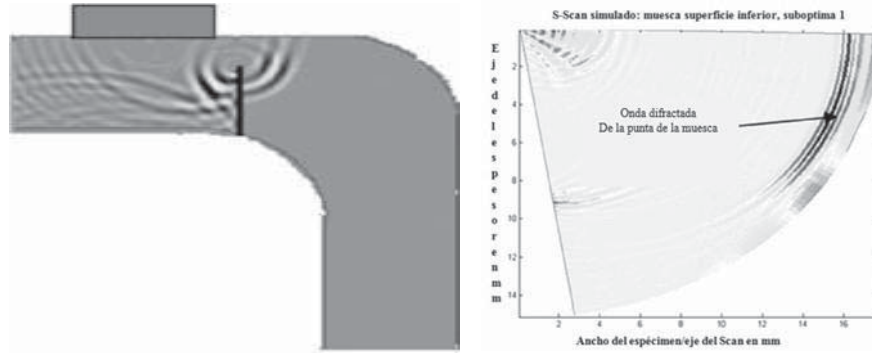


Figura 2.28 Esquema de la posición óptima para la detección del defecto en la superficie posterior de una sección de codo con una imagen en S-Scan. [26]

Los datos simulados y experimentales fueron utilizados para dimensionar los defectos y realizaron una comparación con los tamaños reales de los defectos. Mostraron la eficacia de las imágenes de S-Scan con un ángulo de inspección de 45°, con el que se realizaron varias inspecciones en las porciones curvadas del codo de tubería.

Muestran que el modelo desarrollado en el estudio se puede utilizar para estudiar la interacción de las ondas ultrasónicas con los defectos de diversas configuraciones o la propagación de las ondas en las muestras con geometrías complejas.

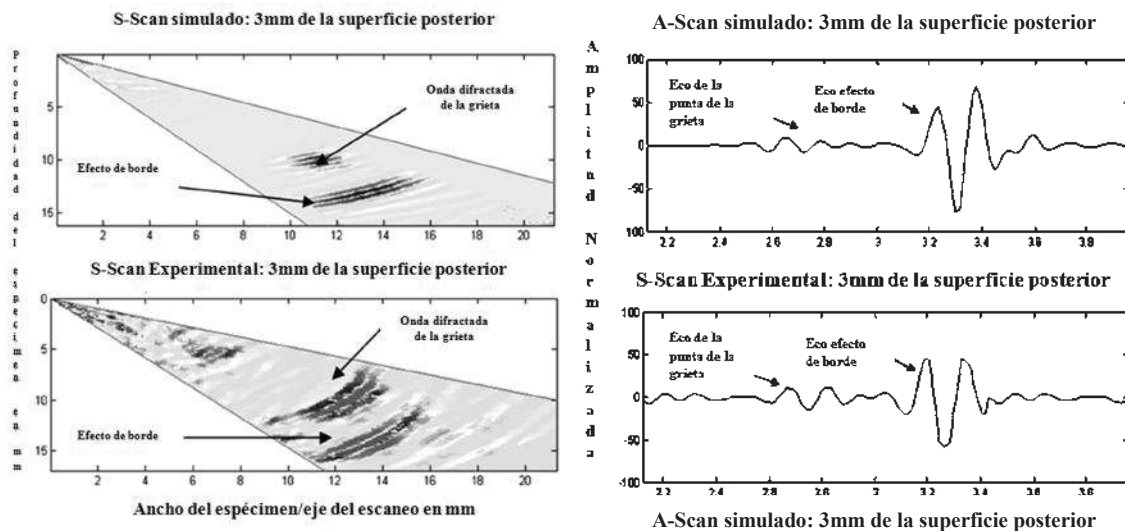


Figura 2.29 Comparación de imagen S-scan de grietas en la superficie inferior simulada y experimental en un espécimen de tubería. [26]

P. Ciorau [27]. Realizo un estudio acerca de la detección y caracterización de defectos lineales y hace una comparación entre las técnicas de ultrasonido convencional y el de arreglo de fases. El estudio se enfoca en la medición de la altura de grietas inducidas por fatiga en especímenes creadas en condiciones de laboratorio además de muescas creadas en muestras con electroerosión. El rango de altura de las grietas están entre los 0.6 y los 12.7 mm. La detección y caracterización se enfoca en la técnica de tiempo de vuelo, en la cual para los palpadores convencionales usan la técnica de la difracción de la punta del eco, figura 2.29.

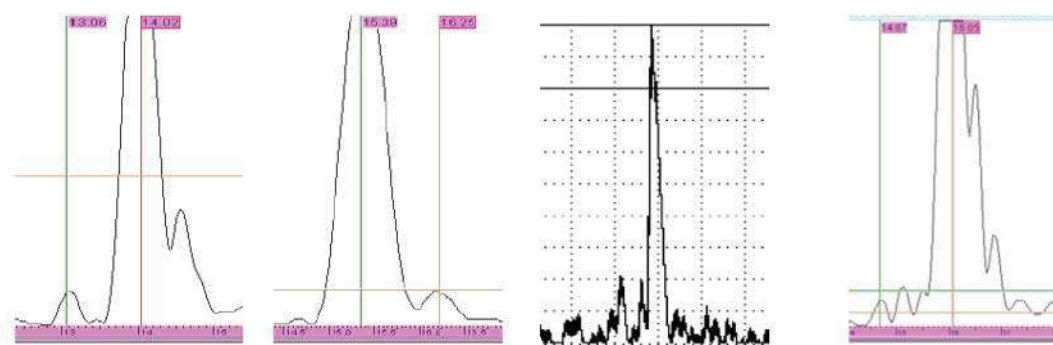


Figura 2.30 Ejemplo de la evaluación de la altura de la grieta, usando el pico anterior y posterior. [27]

Con el transductor de arreglo de fases con la técnica de corrección de volumen para las imágenes S-Scan, con las cuales se podrán dimensionar grietas entre ± 0.5 mm. Para realizar esta inspección se tomaron en cuenta los siguientes hechos: haz enfocado, múltiples A-Scan, combinación de vistas, incremento de la relación ruido-síñal, uso de ondas longitudinales de alta frecuencia (> 10 MHz).

En el estudio se muestra la capacidad para el dimensionamiento de las grietas se hace una comparativa de los resultados experimentales los cuales se grafican espesor contra altura de la grieta, esto se hace a diferentes frecuencias y con ambos tipos de ondas; longitudinales y de corte, figura 2.32.

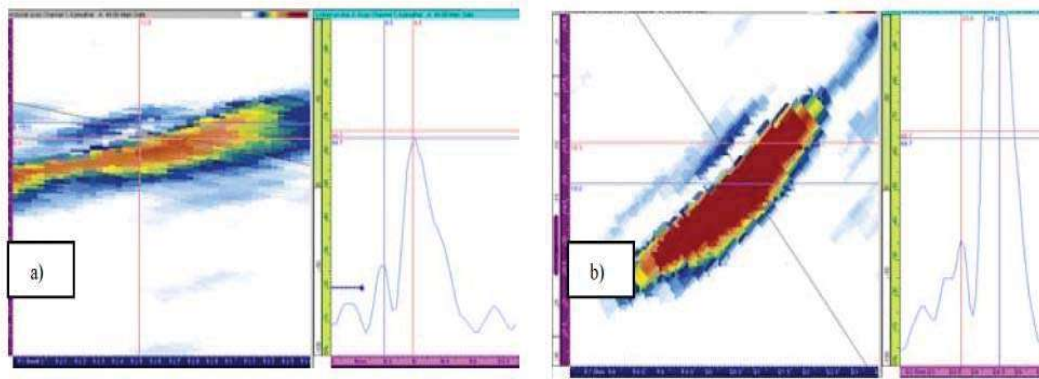


Figura 2.31 Ejemplo de la medición de la altura de la grieta usando la técnica de corrección de volumen en las imágenes S-Scan. a) $H_{PA}=0.8$ mm; $H_C= 0.6$ mm en la barra; b) $H_{PA} = 1.4$ mm; $H_c = 1.2$ mm en la barra. [27]

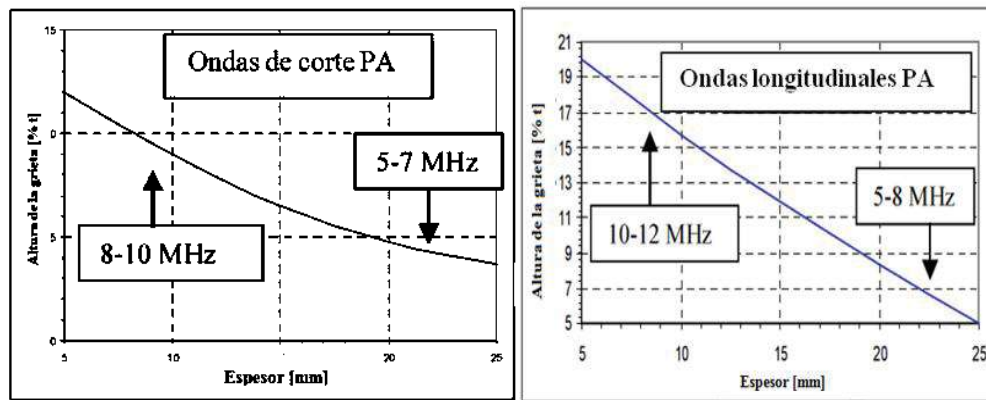


Figura 2.32 Capacidad de dimensionamiento de grietas para la técnica de arreglo de fases: a) ondas de corte; b) ondas longitudinales. [27]

Se observó que hay una mejor precisión en el dimensionamiento de grietas con la técnica de arreglo de fases en comparación con el ultrasonido convencional, así como el fácil reconocimiento del patrón característico de una grieta en el arreglo de fases.

Michael T. Anderson et al. [28]. Realizó un estudio para evaluar las técnicas de ultrasonido con arreglo de fases para detectar y dimensionar con precisión el tamaño de los defectos de la cara oculta de la soldadura de tuberías con acero austenítico forjado. En este trabajo fabricaron cuatro soldaduras circunferenciales de 610 mm de diámetro y 36 mm de espesor, las soldaduras se realizaron variando los parámetros de soldadura tales como; voltaje, amperaje, número de pasada, temperatura de precalentamiento, velocidad de avance, etc.

A las probetas se les realizaron una serie de cortes con un mecanizado de electro-descarga (EDM) para simular muescas, también fueron implantadas grietas por fatiga en la zona afectada térmicamente, esta con las dimensiones que se menciona en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Características de las grietas implantadas en la muestra de tubería. [28]

Designación de la grieta	A	B	C	D	E
Orientación de la grieta	Circ.	Circ.	Circ.	Axial	Circ.
Longitud de la grieta[±1.0 mm]	10 mm	30 mm	44 mm	13 mm	34 mm
Profundidad de la grieta [±1.0 mm]	5 mm	15 mm	22 mm	7 mm	17 mm
% espesor de la pared	15	43	64	19	48
Localización circunferencial (desde 0°)	30°	65°	165°	270°	330°

Los cortes los realizaron variando la profundidad desde el 7.5 % hasta el 28.4% a través del espesor, mientras que las grietas varían desde el 5% hasta el 64% en profundidad a través del espesor, las cuales se examinaron con dos palpadores de arreglo de fases; uno de 2 MHz en modo de emisión-recepción de ondas longitudinales y otro de transmisión-recepción de ondas de corte de 2 MHz de frecuencia. Demostraron que con ambos transductores de arreglo de fases fueron capaces de detectar con precisión la longitud y tamaño, pero no la profundidad de todas las muescas y defectos a través de la soldadura, figura 2.33.

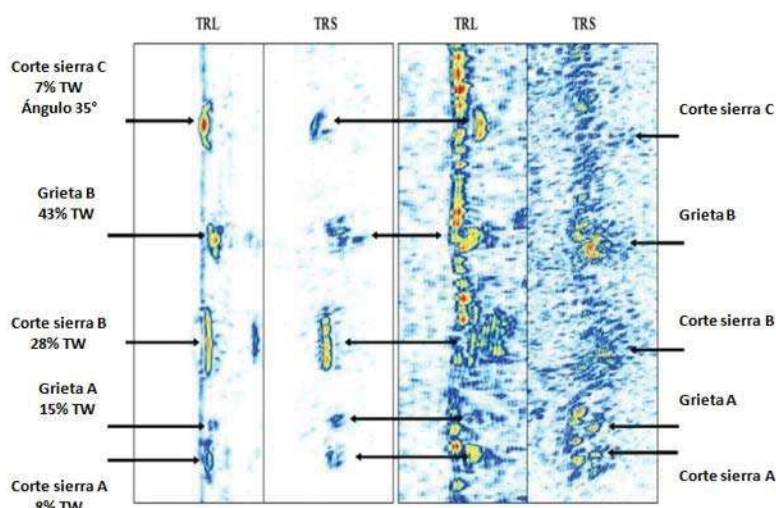


Figura 2.33 Vista en B-Scan del espécimen 1, segmento 1, desde el lado cercano y el lado lejano con arreglos TRL Y TRS. [28]

CAPÍTULO III. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Para este estudio se seleccionaron dos materiales, API 5L X60 Y X65. El material se encuentra en una sección de tubería soldada mediante el proceso de soldadura de arco sumergido [6], el cual está estipulado para la unión de dichos materiales [4]. El material se seccionó para obtener probetas con dimensiones 250x20x15 mm.

Posteriormente se seleccionaron algunas de las probetas de ambos materiales a las cuales se les introdujeron defectos simulados en forma aleatoria dentro de las tres zonas de la soldadura (cordón de soldadura, ZAT y metal base). Después se realizó la inspección ultrasónica con arreglo de fases a las distintas probetas, esta se llevó a cabo con diferentes ángulos de inspección (45° y 65°) y normal a la superficie. La frecuencia central de los transductores que se utilizaron será de 5 y 10 MHz, se utilizó la configuración de activación/desactivación de los elementos piezoeléctricos de los transductores para observar la variación de la apertura efectiva, longitud del campo cerca y campo lejano y la divergencia del haz incidente. Para obtener la mayor información posible y a continuación hacer la detección, clasificación y caracterización de los defectos, figura 3.1.

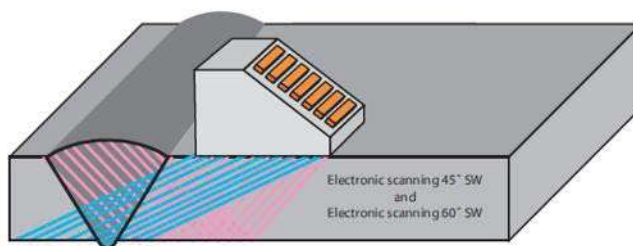


Figura 3.1 Esquema usando arreglo de fases con distintos ángulos de inspección

3.1 Fabricación de Probetas

3.1.1 Probetas de Cobre

Para llevar a cabo la inspección ultrasónica con arreglo de fases se crearon varias probetas de cobre (Cu) con diferentes dimensiones de inclusiones de estaño. El número de probetas de cobre que se maquinaron fueron 6, cuyas dimensiones fueron 20.5 cm de largo por 6 cm de ancho, teniendo un espesor de 1.27 cm.

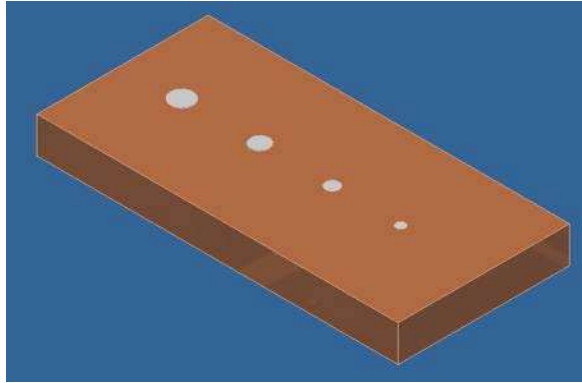


Figura 3.2 Barra de cobre con inclusiones de estaño con diferentes profundidades.

Después se hicieron una serie de barrenos no pasados con diferentes profundidades y diámetros, ya sea de forma circular o de forma elíptica. En la probeta #1 se le crearon 4 barrenos con cortadores de 0.7938, 0.635, 0.4763 y 0.3175 cm respectivamente, con una profundidad de 6.35 mm. De modo que para la probeta #2 se le formaron los mismos barrenos pero a una profundidad de 3.81 mm y para la probeta #3 a una profundidad de 1.27 mm como se puede observar en la siguiente Figura 2.3

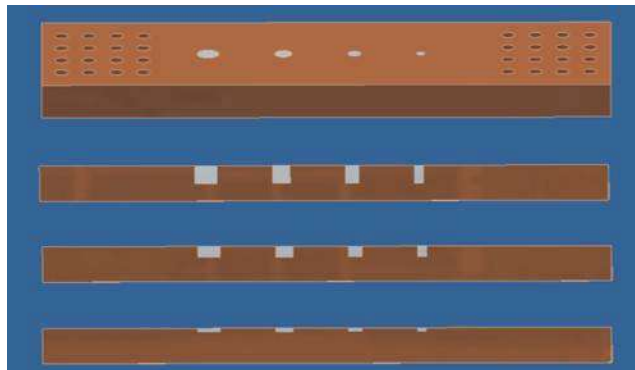


Figura 3.3 Barras de cobre con inclusiones de estaño con diámetros de 7.938, 6.35, 4.76 y 3.18 mm. Con profundidades de 1.27, 3.81 y 6.35 mm, respectivamente.

Para las probetas #4, #5 y #6 se crearon 3 barrenos en cada una de las probetas de cobre de forma elíptica con las siguientes dimensiones:

Tabla 3.1 Dimensiones de las inclusiones elípticas.

		Radio a			
			6mm	7mm	8mm
Radio b	7 mm		X		
	9 mm		X	X	X
	11 mm		X	X	X

La profundidad de las inclusiones de las probetas #4, #5 y #6 es de 5 mm.

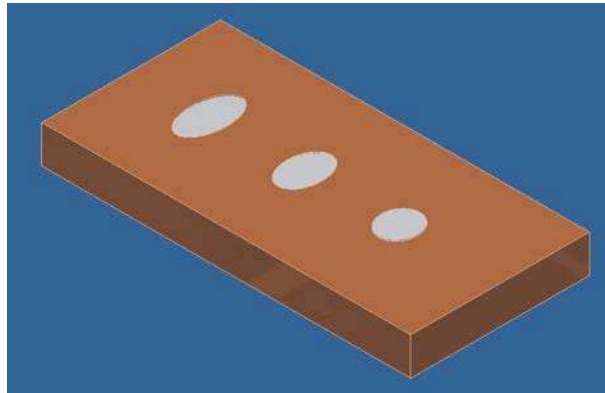


Figura 3.4 Configuración esquemática de las probetas #7, #8, #9 con inclusiones de forma elíptica.

El maquinado de estas piezas se realizó en una FRESADORA DE CNC DYNA EM3116, con el fin de obtener piezas con la mayor precisión posible en lo que se refiere a la profundidad de los barrenos creados para las inclusiones artificiales. Una vez que se obtuvieron los barrenos no pasados en las barras de cobre, se prosiguió al rellenado de dichas perforaciones con estaño, para poderlas rellenar se tuvieron que calentar las probetas a una temperatura de 300°C para poder fundir el estaño y así obtener un relleno uniforme en los orificios creados. En la tabla 3.2 se muestran las propiedades físicas tanto del material base (cobre), como el de las inclusiones (estaño).

Tabla 3.2 Propiedades físicas del cobre y estaño.

PROPIEDAD FÍSICA	COBRE	ESTAÑO	UNIDADES
Impedancia acústica (Z)	41.61X10 ⁶	24.20X10 ⁶	Kg/m ² S
Velocidad longitudinal (C _L)	4660	3320	m/s
Velocidad transversal (C _T)	2260	1670	m/s
Densidad (ρ)	8960	7365	Kg/m ³

3.1.2 Probetas de Aluminio

Las aleaciones de la serie 7000 añaden al aluminio contenidos variables de Zn, Mg y Cu que al combinarse entre sí forman compuestos intermetálicos del tipo $MgZn_2$ que es el principal elemento endurecedor de estas aleaciones, y debido a la alta solubilidad del zinc y magnesio en el aluminio, permite una alta densidad de precipitados y por lo tanto un elevado índice de endurecimiento. La aleación más importante de esta serie es la 7075, que tiene una composición aproximada de 5.6% de Zn, 2.5% de Mg, 1.6% de Cu y 0.25% de Cr, que con un tratamiento T6 alcanza resistencias a tracción de 504 MPa. La mayor importancia de las aleaciones de esta serie está en que alcanzan mediante envejecimiento natural unas elevadas prestaciones mecánicas por lo que se utilizan ampliamente en trenes de aterrizaje, principalmente en la industria aeronáutica

De igual forma se elaboraron tres probetas de aluminio (Al7075) cuyas dimensiones son 20.5 cm de largo por 6 cm de ancho, teniendo un espesor de 1.27 cm de espesor.

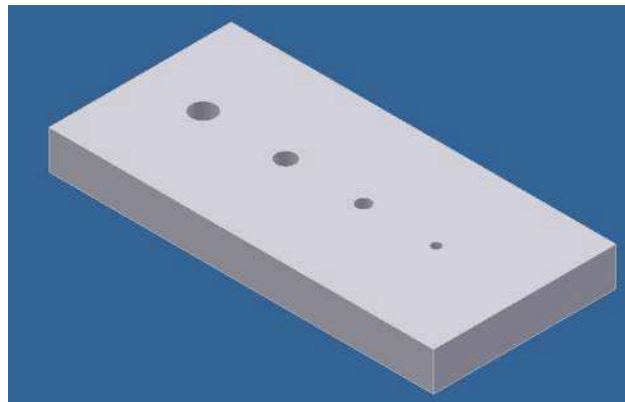


Figura 3.5 Probeta de aluminio con barrenos vacíos.

Después se hicieron una serie de barrenos no pasados con diferentes profundidades y diámetros, en este caso solo de forma cilíndrica. Las profundidades de los barrenos no pasados son del 10, 30 y 50% del espesor de la probeta respectivamente, la distancia que se eligió entre una inclusión y otra fue de aproximadamente 2 cm, con el fin de que al realizar la inspección de la pieza no se obtuvieran lecturas erróneas debido a su proximidad entre ellas. Una vez obtenidos los barrenos no pasados sobre las barras de aluminio, a estas no se

les realiza nada para de esta forma simular porosidad del material para realizar las inspecciones con ultrasonido con arreglo de fases.

Tabla 3.3 Propiedades físicas de Aluminio y el Aire.

PROPIEDAD FÍSICA	ALUMINIO	AIRE	UNIDADES
Conductividad Eléctrica (σ)	37.7×10^6	$3 \times 10^{-15} - 8 \times 10^{-15}$	A/Vm
Conductividad Térmica (k)	237	0.024	W/mK
Impedancia acústica (Z)	17.06×10^6	429	Kg/m ² S
Velocidad longitudinal (C_L)	6320	-	m/s
Velocidad transversal (C_T)	3130	-	m/s
Densidad (ρ)	2698.4	1.2 (20°C)	Kg/m ³

3.2 Probetas soldadas

Para la inspección de soldadura con arreglo de fases se utilizaron 2 probetas de X60, una de ellas como material base y la otra con defectos simulados mediante 3 perforaciones en forma vertical con las siguientes dimensiones 2.38 mm, 1.98 mm y 1.58 mm respectivamente, las dimensiones de las probetas son 200 mm de largo por 25 mm de ancho y un espesor de 14.3mm como se observa en la figura 3.6.

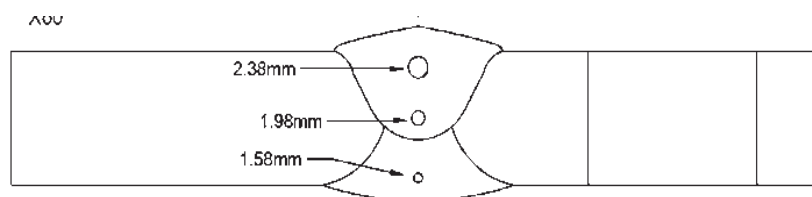


Figura 3.6 probeta de X60 con defectos simulados.

Para la probeta de acero microaleado X65 se cortaron con las siguientes dimensiones, 200mm de largo por 25mm de ancho y un espesor de 9.8 mm. A estas probetas se le realizaron los defectos simulados de forma horizontal realizando de igual forma tres defectos con las siguientes dimensiones 2.38 mm, 1.98mm y 1.58 mm respectivamente esto se muestra en la figura 3.7.

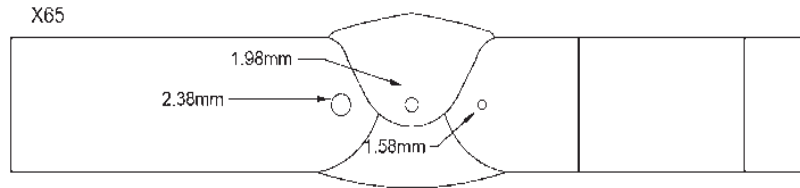


Figura 3.7 Probeta con defectos simulados en forma horizontal en acero microaleado X65.

Se llevó a cabo la elaboración de más probetas de soldadura para la observación de defectos de soldadura, estas se llevaron a cabo con un acero al carbón A572 Gr50, la soldadura de las probetas se lleva a cabo con el proceso de soldadura de electrodo revestido (SMAW) de forma manual esto con la finalidad de introducir la mayor cantidad posible de defectos dentro del material de aporte. Las probetas se dividieron en tres arreglos distintos las primeras tres probetas se realizaron a tope sin preparación de la unión y con una separación de raíz de 3.2 mm. Las dimensiones de las placas que se unieron son de 90X200 mm. un espesor de 12.7 mm. Estas dimensiones se tomaron para tener un espacio suficiente para el barrido con el transductor de arreglo de fases y de acuerdo a las distancias calculadas de la primera y segunda pierna como se muestra en la figura 3.8.

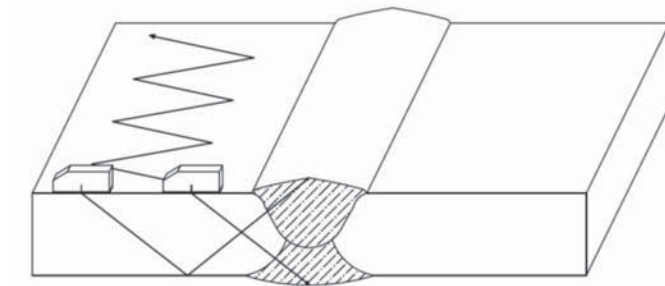


Figura 3.8 Configuración de las probetas a tope de acero al carbón.

También se realizaron dos probetas mas con acero al carbón las dimensiones de las placas son de 90mm de ancho 200mm de largo y 12.7 mm de espesor, se les realizó una preparación de junta un bisel con ángulo de chaflán de 60°, un talón de 3mm y una separación de raíz de 3.2 mm. Una de ellas se utilizó como probeta de referencia ya que se procuro se realizara de la mejor forma la soldadura y de esta forma hacer una comparación con la otras probetas.

Después se realizaron dos probetas más estas en la configuración en T con el proceso de soldadura de electrodo revestido (SMAW), estas uniones se llevaron a cabo sin preparación de borde y con la placa en la posición horizontal de dimensiones 90x200mm y la placa vertical de 45X200mm. con un espesor de 12.7 mm como se observa en la figura 3.9.

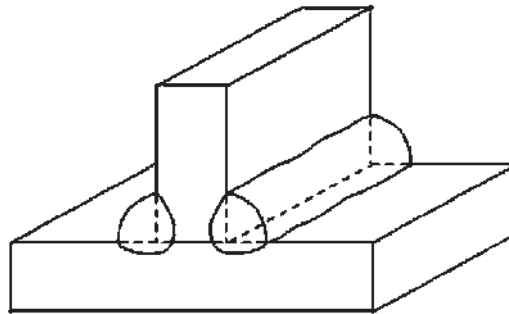


Figura 3.9 Configuración de las probetas soldadas con junta en T.

3.3 Equipo de Arreglo de Fases Ultrasónico

El equipo que se utilizó un EPOCH 1000i de la marca OLYMPUS® es un equipo portátil y robusto que combina herramientas de ultrasonidos con Arreglo de Fases y convencionales para la detección de defectos. Estas herramientas incrementan la probabilidad de detección, mejoran la nitidez de las zonas de interés y aumentan la eficacia de inspección, ya que sólo basta una única configuración para visualizar los A-Scan de varios ángulos.



Figura 3.10 Equipo para inspección ultrasónica con Arreglo de Fases.

El equipo está disponible en la configuración estándar 16:16 que puede ser optimizada a 16:64, el EPOCH 1000i cuenta con varias herramientas de medición que facilitan la inspección, como las imágenes A-Scan y S-Scan y los cursores de referencia y de medición

para la evaluación de las dimensiones de los defectos. Cabe destacar también la herramienta DAC/TVG para todas las leyes focales que permite caracterizar los defectos en un A-Scan según la curva DAC adquirida [10].

Tabla 3.4 Especificaciones del Equipo de arreglo de fases ultrasónico.

ESPECIFICACIONES DEL MODO PHASED ARRAY DEL EQUIPO	
Leyes Focales	61
Palpador	64 Elementos Máximos
Apertura activa máxima	16 elementos
Filtro de video	Desactivado, bajo y alto
Imágenes	A-Scan, S-Scan, E-Scan, C-Scan, A-Scan
Velocidad de actualización	60 Hz para todos los A-Scan; 20 Hz para Imágenes

3.4 Palpadores de Arreglo de Fases del equipo ultrasónico.

El equipo ultrasónico EPOCH 1000i soporta una serie de palpadores de arreglo de fases que satisfacen las exigencias de las inspecciones críticas. Esta serie incluye Palpadores especializados para normas particulares y Palpadores estándares para inspecciones de soldaduras, como los palpadores Phased Array con zapata integrada. En las tablas 3.4 y 3.5 se muestran la gama de palpadores que se pueden utilizar en el equipo de arreglo de fases y además nos muestran algunas de sus características de operación.

Tabla 3.5 Palpadores Utilizados en el Olympus Epoch 1000i.

Nº. De Referencia	Uso/Norma	Frecuencia (MHz)	Cantidad de Elementos	Paso (mm)	Apertura Activa (mm)	Elevacion (mm)	Dimensiones en mm (largo x ancho x alto)		
2.25L8-A10P	Uso General	2.25	8	1.2	9.6x10	10	22.5	15.6	20
5L16-A10P		5	16	0.6	9.6x10	10	22.5	15.6	20
10L16-A10P		10	16	0.6	9.6x10	10	22.5	15.6	20
2.25L16-AWS1	AWS D1.1/D1.5	2.25	16	1	16x16	16	37.6	25.4	17.8
2L8-DGS1	Zapata	2	8	1	8x9	9	27.3	16.8	22.3
4L16-DGS1	Integrada/DGS/AVG	4	16	0.5	8x9	9	27.3	16.8	22.3
5L64-A12	Uso General	5	64	0.6	38.4x10	10	22.5	44.6	20

Tabla 3.6 Zapatas utilizadas en el Olympus Epoch 1000i.

Nº. De Referencia	Palpador Correspondiente	Angulo de refraccion nominal del haz (en acero)	Barrido (°)	Orientacion del Palpador	Dimensiones en mm (largo x ancho x alto)		
SA10P-OL	2.25L8-A10P, 5L16-A10P, 10L16-A10P	OL DE 0°	-30 a +30	Normal	25.4	23.1	20
SA10P-N55S	2.25L8-A10P, 5L16-A10P, 10L16-A10P	OT DE 55°	30 a 70	Normal	23	23.2	14.2
SAWS1-OL	2.25L16-AWS1	OL DE 0°	-30 a +30	Normal	38	37.6	40
SAWS1-N605	2.25L16-AWS1	OT DE 55°	30 a 70	Normal	45.3	38	30.3
SA12-OL	5L64-A12	OL DE 0°	-30 a +30	Normal	61.8	23	53.4
SA12-N55S	5L64-A12	OT DE 55°	30 a 70	Normal	58	23	23

3.5 Calibración de Haz Normal y Angular

Para el correcto uso de los transductores de arreglo de fases ultrasónico de debe llevar a cabo una calibración de estos y del equipo de acuerdo al modo de operación del equipo, ya sea en su forma de haz normal a la superficie o en forma angular. De igual forma de debe realizar una calibración para cada una de las frecuencias de inspección utilizadas que en este caso se realizo para las frecuencias de 5 y 10 MHz respectivamente. La calibración del equipo se realiza siguiendo los pasos establecidos de forma práctica y sencilla en el manual de operación del equipo de arreglo de fases [15]. De igual forma en este procedimiento de calibración se utilizaron bloques de calibración que se especifican en el manual tales como el bloque de diferentes espesores y el bloque de calibración angular IIW que se muestran en la figura 3.11.



Figura 3.11 bloques de calibración para el equipo de arreglo de fases.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

4.1 Cálculo de la primera y segunda pierna para la zona de inspección.

De acuerdo a la ley de Snell para el fenómeno de reflexión del haz ultrasónico y de acuerdo a la literatura para llevar a cabo la inspección sobre las probetas de soldadura con mayor precisión, se debe llevar a cabo el cálculo de la primera y segunda pierna, conceptos que definen la zona en la que se debe acoplar el transductor ultrasónico para que el haz ultrasónico interaccione con la zona deseada dentro del material a inspeccionar. La primera pierna se refiere a la distancia donde la incidencia del haz ultrasónico es directa sobre la zona que se desea inspeccionar, en este caso es sobre la parte inferior del cordón de soldadura como se puede observar en la figura 4.1. Mientras que la segunda pierna es la distancia en la cual se hace incidir el haz ultrasónico utilizando la primera reflexión del haz ultrasónico y que esto se define de acuerdo al ángulo de incidencia del haz en este caso de 55° determinado por el transductor y la zapata, y también con base en el espesor de las probetas a inspeccionar.

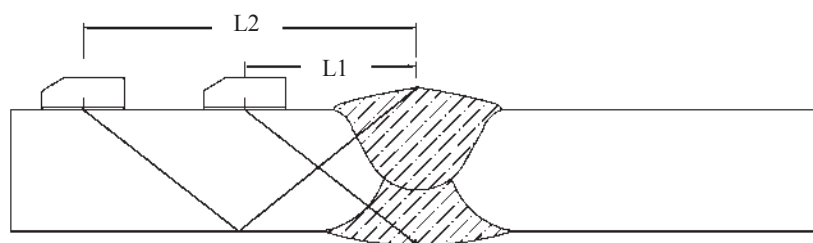


Figura 4.1 Esquema de la interacción de haz ultrasónico en la primera pierna (L1) y segunda pierna (L2).

A continuación se presenta una tabla con cada uno de los valores obtenidos para las piernas en referencia al espesor del material utilizado en cada una de las probetas utilizadas para llevar a cabo la inspección ultrasónica.

Tabla 4.1 valores calculados para la primera y segunda pierna.

PROBETA	ESPESOR	PRIMERA PIERNA (L1)	ZONA INTERMEDIA (Lint)	SEGUNDA PIERNA(L2)
COBRE	12.7 mm	18.13 mm	27.195 mm	36.26 mm
ALUMINIO	12.7 mm	18.13 mm	27.195 mm	36.26 mm
X60	14.30 mm	20.4225 mm	30.6837 mm	40.845 mm
X65	9.80 mm	20.9937 mm	20.9937 mm	27.9916 mm
A572	12.7 mm	18.13 mm	27.195 mm	36.26 mm

4.2 Zonas e interpretación en la combinación de imágenes de arreglo de fases.

Una imagen de arreglo de fases consta de diferentes partes que deben comprenderse para su mejor evaluación e interpretación. En la figura 4.2 se muestran algunas características que comprenden las imágenes obtenidas en una inspección por arreglo de fases ultrasónico.

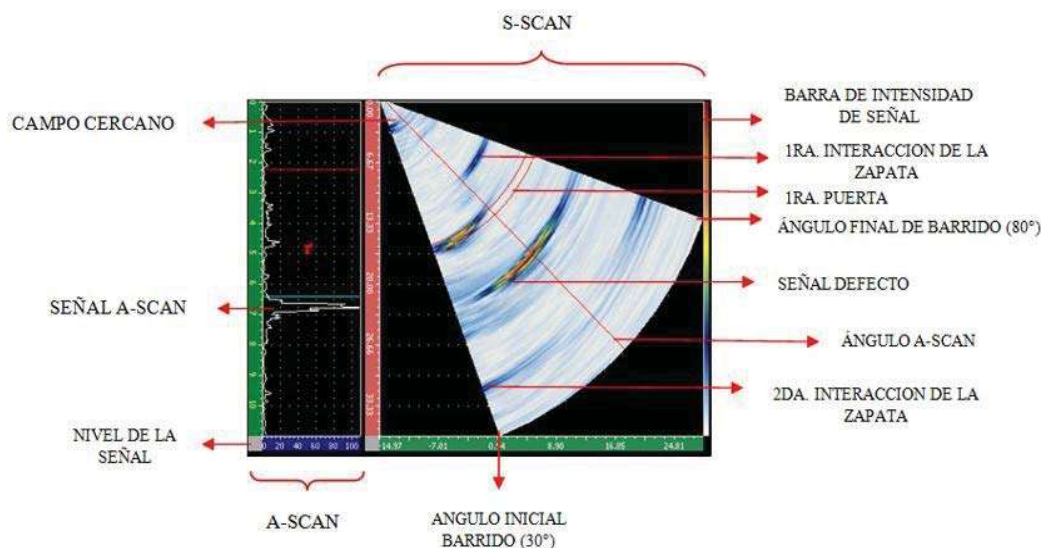


Figura 4.2 Partes que comprenden una imagen S-Scan de arreglo de fases.

Además de todas las partes que conforman las imágenes S-Scan existe una serie de herramientas que nos ayudan a evaluar e interpretar estas imágenes tales como cursores (X,Y) en la imagen S-Scan y cursores de referencia en la señal A-Scan. Esto se muestra en la figura 4.3

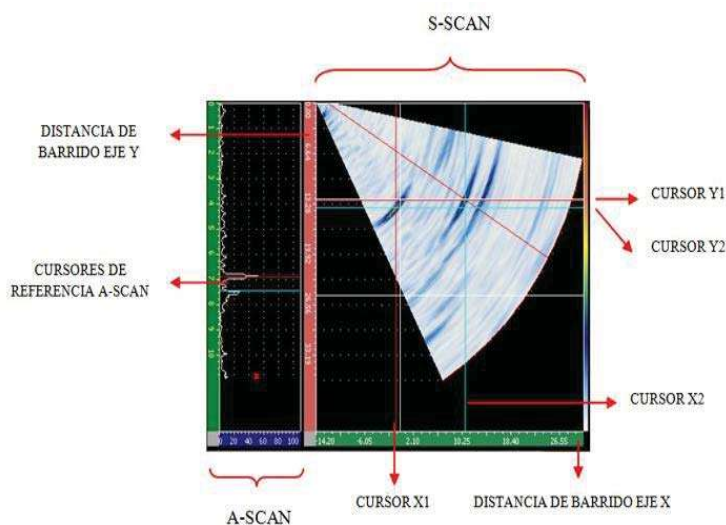


Figura 4.3 Evaluación de una imagen S-Scan mediante la utilización de los cursores X-Y.

4.3 Efecto de la orientación de los defectos con respecto a la incidencia del haz ultrasónico.

En la inspección ultrasónica con arreglo de fases la orientación de las discontinuidades deberá ser tal que permita alguna reflexión del haz ultrasónico en la dirección adecuada, esto para tener reflexiones que regresan para la formación de las imágenes S-Scan y en consecuencia de las señales A-Scan. La orientación más óptima se produce cuando el plano principal de la discontinuidad es perpendicular al haz ultrasónico, por lo que las discontinuidades que tienen morfologías planas con orientación paralela al haz ultrasónico pueden llegar a no mostrar prácticamente ninguna señal en el formato A-Scan o una imagen S-Scan.

Para determinar la orientación de una discontinuidad, respecto al haz ultrasónico o a la superficie de exploración, será preciso examinarla desde varios ángulos. Si se conoce el historial de la muestra y la naturaleza de las discontinuidades que pueden presentar, puede ser suficiente la exploración desde un solo lado para determinar la orientación de estas.

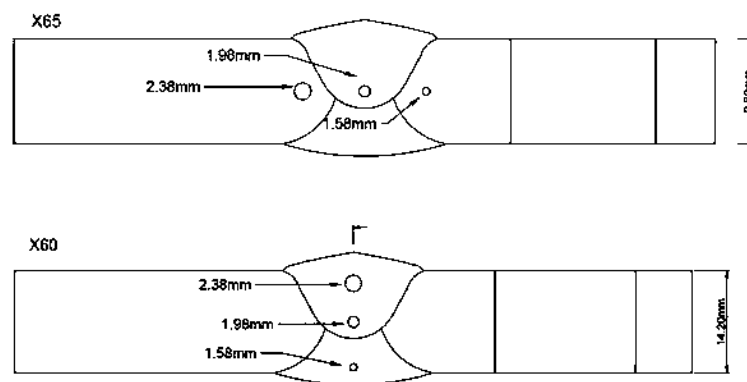


Figura 4.4 Probetas de acero microaleado con defectos simulados en distinta orientación.

A continuación se muestran las imágenes obtenidas para las probetas de acero microaleado con defectos simulados y en dos orientaciones.

4.3.1 Imágenes S-Scan para material X60 con defectos con orientación vertical.

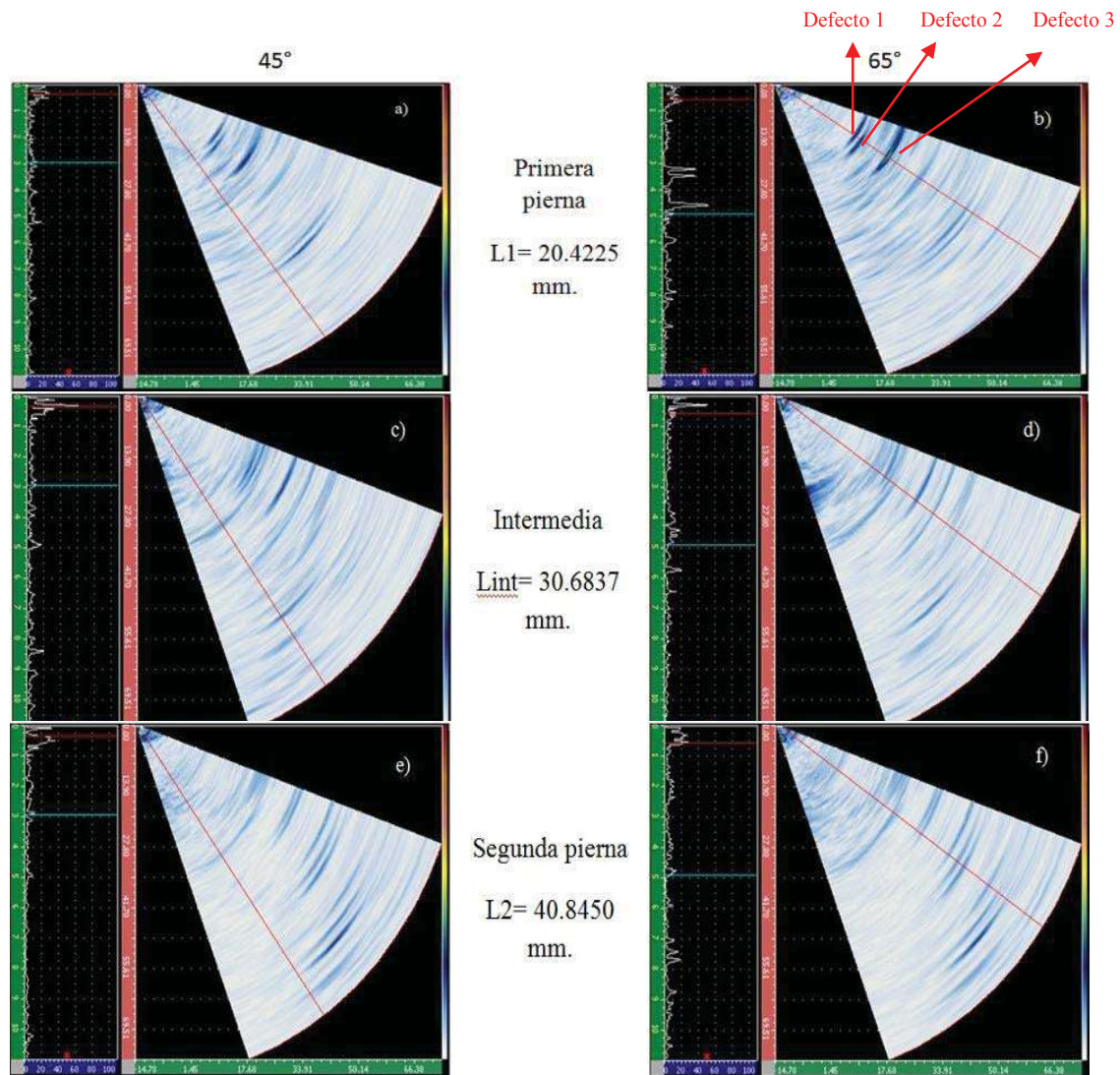


Figura 4.5 Imágenes S-Scan para la soldadura de acero microaleado X60 con 3 defectos simulados en forma vertical a 5MHZ de frecuencia.

La imagen 4.5b muestra el S-Scan obtenido en la inspección de la soldadura de acero microaleado X60 con 3 defectos simulados mediante la perforación de orificios de diferentes diámetros como se observa en la figura 4.4. En la imagen se puede apreciar la posición de cada uno de los defectos mostrando la diferencia existente en el eje vertical y de igual forma esto se puede apreciar en las señales características de A-Scan. De igual forma se puede apreciar en las señales del A-Scan el efecto que tienen los defectos con morfología cilíndrica, es decir la formación de una señal con una base ancha y una amplitud moderada.

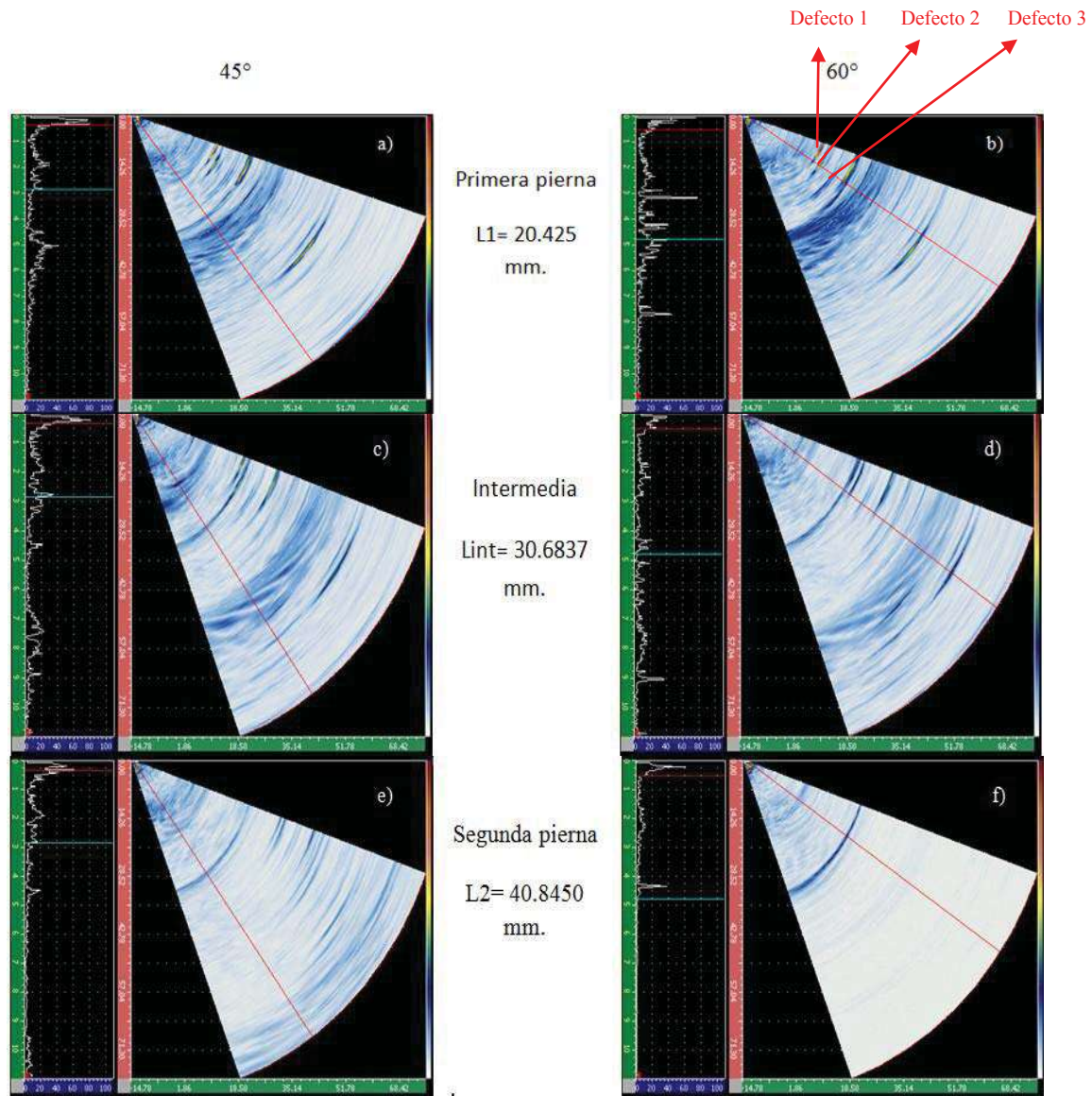


Figura 4.6 Imágenes S-Scan para la soldadura de acero microaleado X60 con defectos simulados en forma vertical para las distancias L1, Lint y L2 utilizando ángulos de 45° y 65° y una frecuencia de 10MHz.

La figura 4.6b nos muestra una inspección a 10 MHz de frecuencia a la soldadura de acero microaleado con defectos simulados en forma vertical, en la figura podemos apreciar la posición en el eje vertical de cada uno de los defectos tanto en la imagen S-Scan como en las señales A-Scan. La imagen nos muestra el incremento de la relación ruido-síñal por la influencia en la utilización de una frecuencia más elevada por lo que la interpretación de las señales A-Scan se vuelve más complicada.

4.3.2 Imágenes S-Scan para acero X65 con defectos con orientación horizontal.

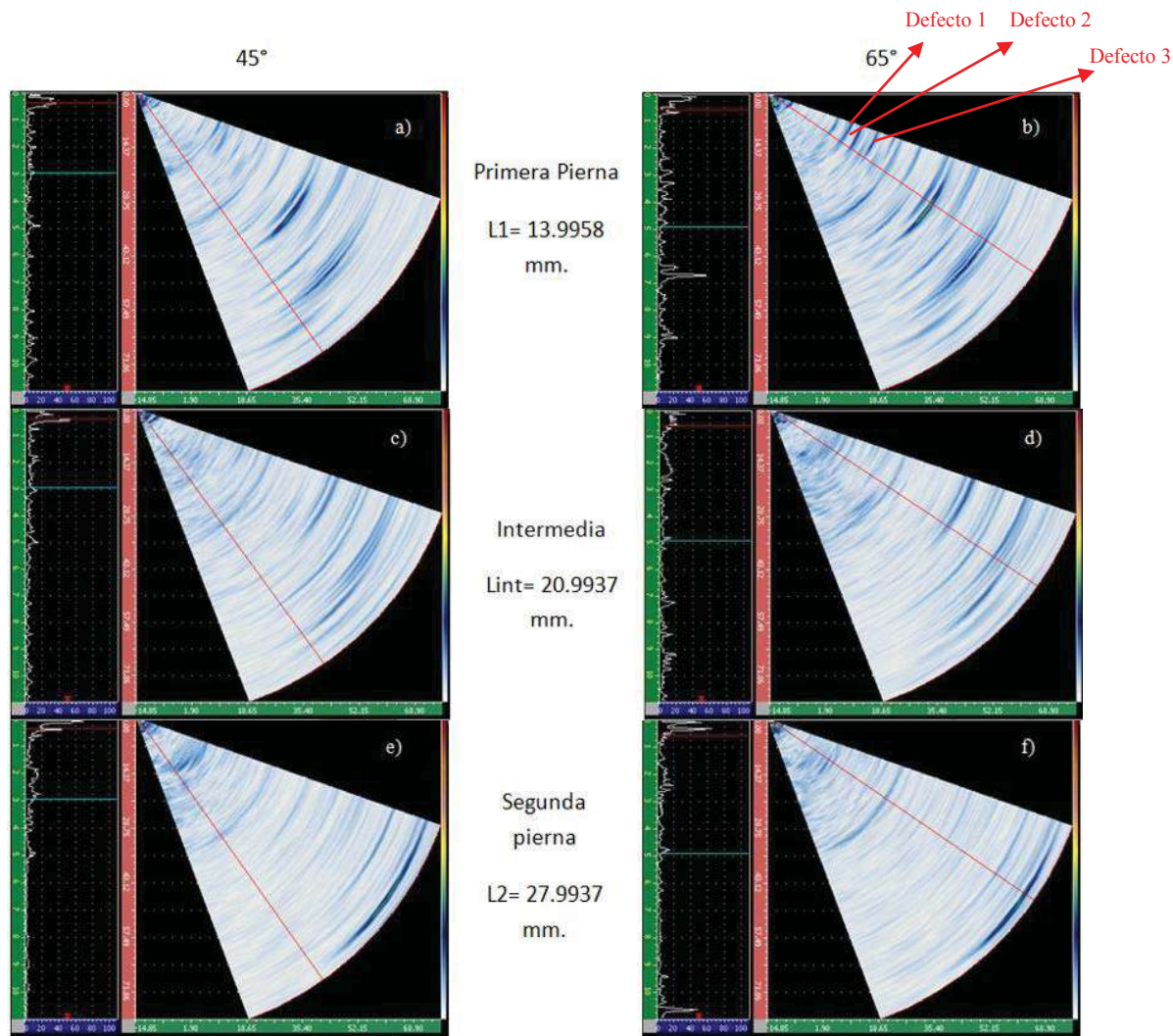


Figura 4.7 Imágenes S-Scan para la soldadura de acero microaleado x65 con defectos simulados en forma horizontal a 5mhz de frecuencia.

La figura 4.7b nos muestra la inspección ultrasónica con arreglo de fases de la soldadura de acero microaleado X65 con defectos simulados mediante la perforación de orificios con diferentes diámetros en posición horizontal como se muestra en la figura 4.4. Esta inspección se realizó con una frecuencia de 5MHz y en la primera pierna de la zona de inspección, en la figura se puede apreciar la posición de los defectos mediante la imagen S-Scan y se puede apreciar la influencia de la morfología de origen cilíndrico en las señales A-Scan.

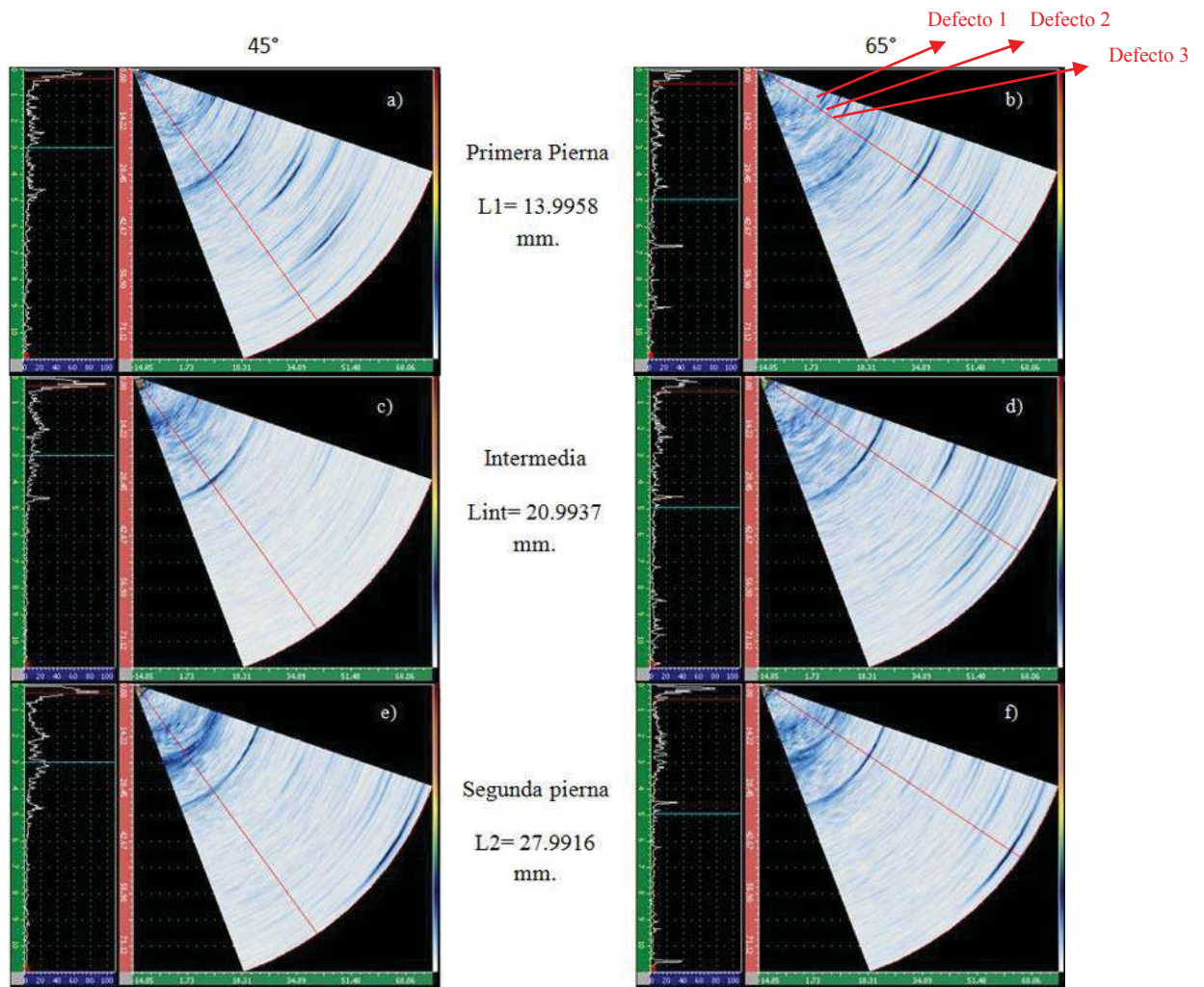


Figura 4.8 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero microaleado X65 con defectos simulados de forma horizontal y 10MHz de frecuencia.

La figura 4.8b muestra la inspección con arreglo de fases ultrasónico a 10MHz de frecuencia de la soldadura de acero microaleado X65 con defectos simulados en posición horizontal. En la imagen se puede apreciar la posición de cada uno de los defectos, también se puede apreciar en el color que muestran los defectos la intensidad de la energía reflejada en la imagen S-Scan. Mientras que en el A-Scan se muestra el aumento de la relación ruido-señal al aumentar la frecuencia de inspección por lo que este aumento en la relación también aumenta la dificultad para apreciar las señales características de los defectos.

4.4 Efecto de la frecuencia de inspección en la detección.

Dada la relación de la frecuencia con la longitud de onda y la velocidad ultrasónica esta es decisiva en cuanto a la detectabilidad de los defectos. Si para alcanzar niveles altos de poder de resolución se utilizan frecuencias de ensayo elevadas, se corre el riesgo de que al aumentar excesivamente el coeficiente de atenuación, se pierda mucho poder de penetración que el ensayo resulte inviable.

Ya que la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda se puede decir que al utilizar una frecuencia de 5MHz para una velocidad ultrasónica de 5900 m/s se tiene una longitud de onda $\lambda = 0.00118$ m. por lo que puede determinar que con esta frecuencia se beneficia la penetración del haz ultrasónico dentro del material de ensayo pero se sacrifica en algún grado la sensibilidad en la inspección, mientras que para la frecuencia de 10MHz se tiene una longitud de onda $\lambda = 0.00059$ m. para la misma velocidad ultrasónica por lo que, en este caso se tiene una alta sensibilidad del haz ultrasónico con lo que aumente el nivel de detectabilidad en los ensayos.

En los ensayos de materiales siempre es necesario buscar un punto óptimo de balance entre una elevada probabilidad de detección a gran profundidad, esto en el caso de la baja frecuencia y una elevada exactitud en la determinación de la extensión y forma de un reflector en el caso de usar frecuencias altas. La tabla 4.2 muestra las frecuencias normalmente empleadas en los ensayos de diversos materiales, en nuestro caso son frecuencias de 5 y 10 MHz.

Tabla 4.2 Frecuencias utilizadas en la inspección ultrasónica.

Margen de frecuencia (MHz)	Aplicación	Ejemplos
0.025-0.1	Materiales de estructura burda	Hormigón, madera, rocas
0.2-1	Productos moldeados	Fundición gris, nodular, cobre, acero inox.
0.4-6	Productos moldeados	Acero, aluminio, latón
0.2-2.25	Materiales plásticos y similares	Combustibles sólidos, cohetes y pólvoras
1-6	Productos laminados	Chapa, laca, barra y palanquilla
2.25-10	Productos estirados y extruidos	Barra y perfiles ferrosos y no ferrosos
1-10	Productos forjados	Materiales ferrosos y no ferrosos
1-2.25	soldaduras	Materiales ferrosos y no ferrosos
1-10	Inspección de mantenimiento	Especialmente grietas por fatiga.

4.4.1 Efecto de la frecuencia en las imágenes S-Scan en probetas de cobre.

4.4.1.1 Probetas de cobre con inclusiones cilíndricas.

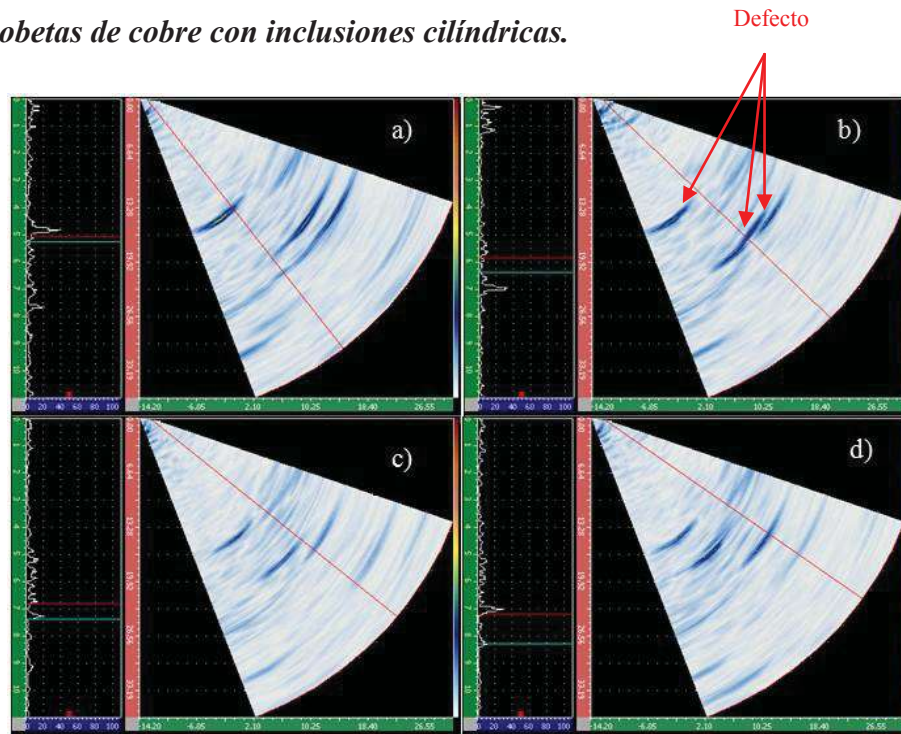


Figura 4.9 imágenes S-Scan de la probeta de cobre #1 a 5 MHz, a) primer defecto, b) segundo defecto, c) tercer defecto, d) cuarto defecto.

La figura 4.9b nos muestra la inspección realizada a una probeta de cobre con inclusiones de estaño simulando defectos de forma cilíndrica, esta inspección se realizó a 5MHz de frecuencia. La figura nos muestra la imagen S-Scan y la señales A-Scan del segundo defecto, ya que dichas probetas contienen cuatro defectos simulados de diferentes diámetros como se explica en el capítulo anterior.

También podemos decir que la figura 4.9b nos muestra la interacción que existe entre el haz ultrasónico y el segundo defecto de la probeta de cobre que en este caso tiene un diámetro de 0.635 cm y una profundidad de la misma dimensión. Las tres interacciones que se pueden apreciar en la imagen las podemos atribuir a cada una de las paredes que conforman el cilindro del defecto simulado, así mismo, se puede observar que la señal A-Scan tiene el comportamiento general que presentan estas señales al interactuar con un defecto con morfología cilíndrica.

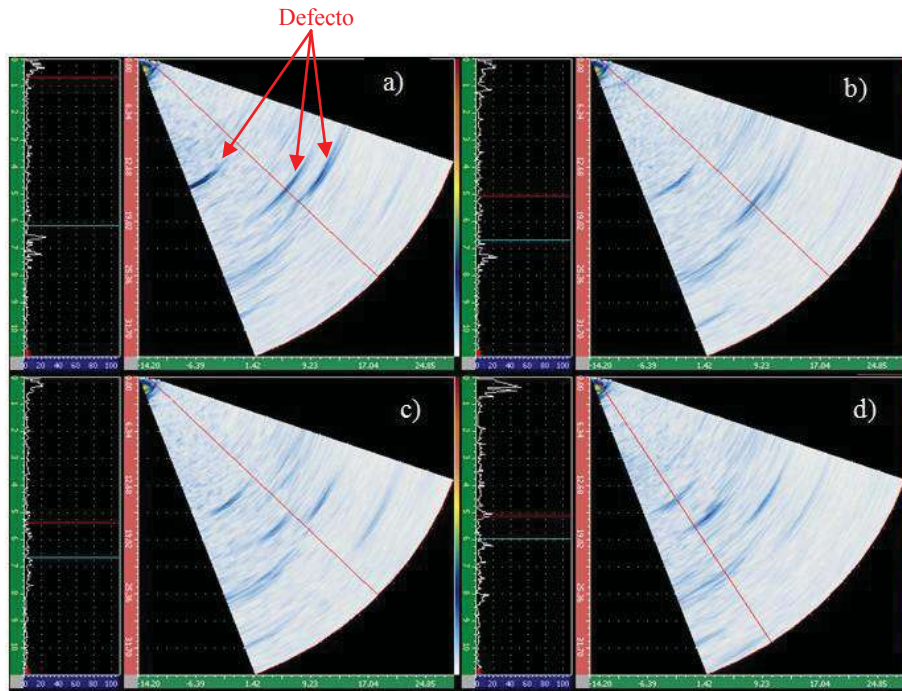


Figura 4.10 Imágenes S-Scan de la probeta de cobre #1 a 10 MHz de frecuencia, a) primer defecto, b) segundo defecto, c) tercer defecto, d) cuarto defecto.

La figura 4.10 nos muestra la inspección ultrasónica con arreglo de fases realizada a la probeta de cobre número 1 con cuatro defectos simulados de estaño, esta inspección realizada a 10 MHz de frecuencia. Como podemos ver en la figura 4.10a se puede apreciar la interacción del haz ultrasónico con las paredes que forman el cilindro formado por el defecto. El defecto tiene un diámetro de 7.938 mm y una profundidad de 6.35 mm.

En este caso se puede apreciar la disminución del ruido de fondo, es decir la relación ruido señal esto atribuido a la utilización de la frecuencia de 10 MHz y a la naturaleza del material inspeccionado (impedancia acústica), esto permite realizar de una manera más sencilla y eficaz al no existir señales no relevantes u otros efectos que pueden aparecer debido a la interacción del haz ultrasónico.

4.4.1.2 Probetas de cobre con inclusiones de forma elíptica.

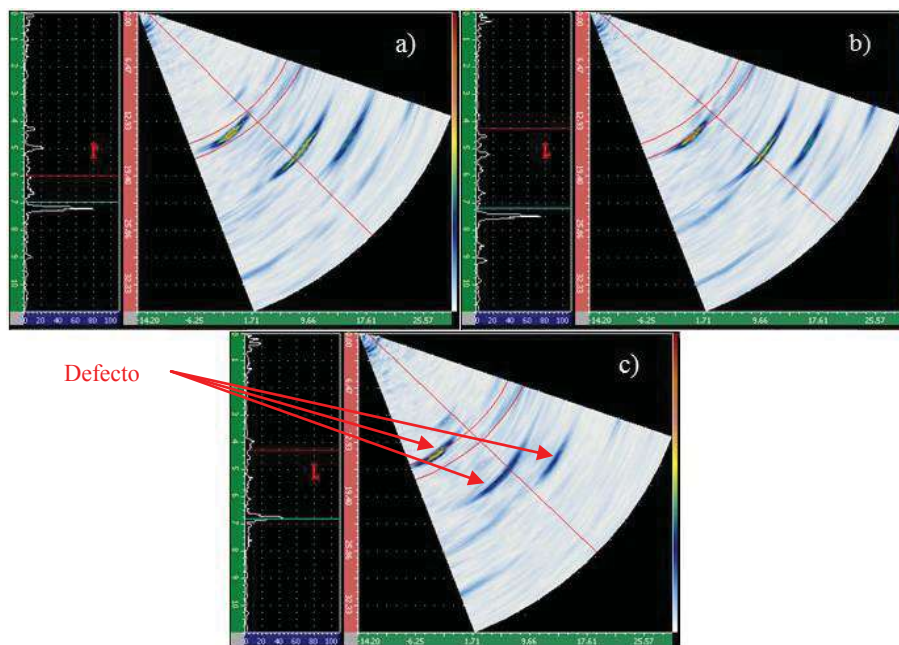


Figura 4.11 Imágenes S-Scan de la probeta de cobre con defectos simulados de forma elíptica a 5MHZ.

La figura 4.11 nos muestra la inspección ultrasónica con arreglo de fases a la probeta de cobre número cuatro con defectos simulados de forma elíptica, esta inspección fue realizada a 5 MHz de frecuencia. En la figura 4.12c podemos observar la imagen S-Scan y las señales A-Scan de la inspección del tercer defecto el cual tiene un radio a de 6mm, un radio b de 7 mm y una profundidad de de 5mm. En la imagen S-Scan podemos apreciar la interacción del haz ultrasónico con las paredes reflejantes que forman el defecto, es decir, donde el haz ultrasónico encuentra una interfases construye una indicación e la imagen, en este caso construye 3 indicaciones que podemos atribuírselas a las paredes del defecto. También podemos observar las señales A-Scan para identificar la morfología del defecto, que en este caso se puede decir que es también de forma cilíndrica.

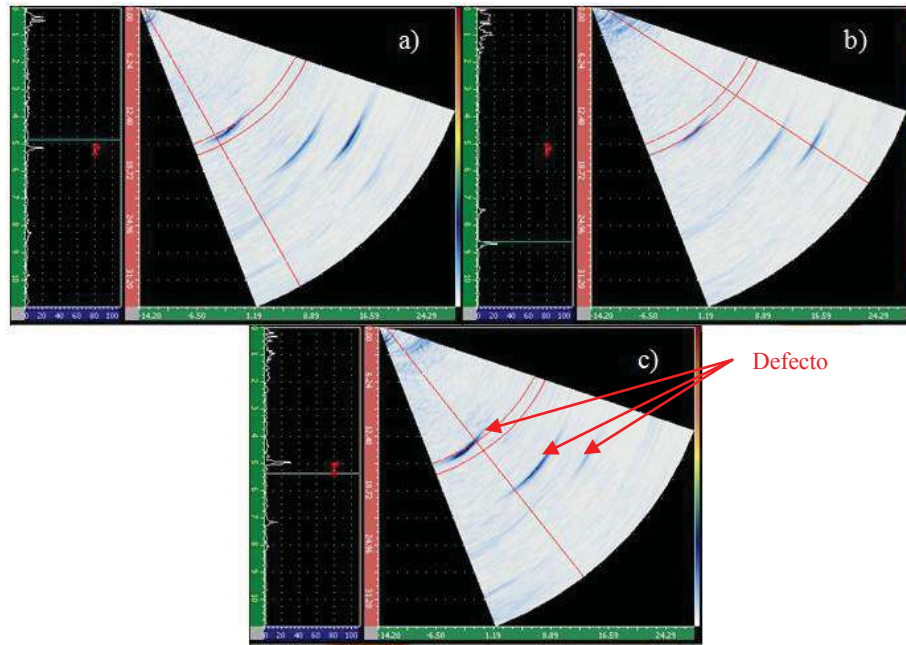


Figura 4.12 Imágenes S-Scan de la probeta de cobre con defectos simulados de forma elíptica a 10MHZ.

La figura 4.12 nos muestra la inspección ultrasónica con arreglo de fases a 10 MHz de frecuencia de la probeta de cobre número 4 con defectos simulados de forma elíptica. En la figura 4.12c podemos ver la imagen S-Scan y A-Scan obtenidas en la inspección del tercer defecto con un radio a de 6mm, radio b de 7 mm y una profundidad de 5 mm. En esta imagen podemos apreciar el efecto de la frecuencia ya que la disminución de la relación ruido señal también conocido como ruido de fondo es evidente, también podemos ver que las indicaciones construidas por la interacción del haz ultrasónico con el defecto aparecen más pequeñas y más atenuadas en comparación con las mostradas en la imagen 4.13 que fueron obtenidas a 5 MHz. Como podemos ver también es apreciable este efecto en la amplitud de las señales A-Scan.

4.4.2.3 Probetas de aluminio con defectos simulados.

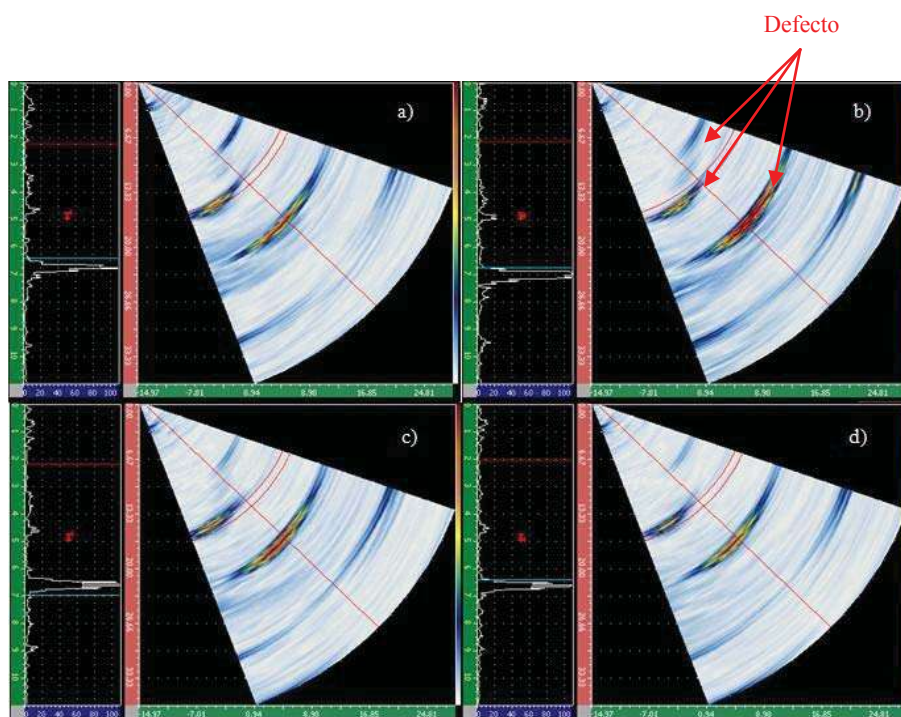


Figura 4.13 Imágenes S-Scan de la probeta de aluminio con 4 defectos simulados inspeccionada con 5MHz de frecuencia.

La figura 4.13 nos muestra la inspección ultrasónica con arreglo de fases a 5 MHz a la probeta de aluminio con defectos simulados mediante perforaciones como se puede apreciar en la figura 3.5 del capítulo anterior. La figura 4.13b nos muestra las imágenes S-Scan y las señales A-Scan obtenidas de la inspección del defecto número 2 que tiene un diámetro de 6.35 mm y una profundidad con la misma dimensión, se puede apreciar el efecto de la frecuencia de 5 MHz en la intensidad de las indicaciones en la imagen S-Scan al igual que en las señales del A-Scan. También podemos ver que al igual que en las probetas de cobre se observan 3 indicaciones construidas a partir de la interacción del haz ultrasónico que se pueden atribuir a las paredes que forman el defecto.

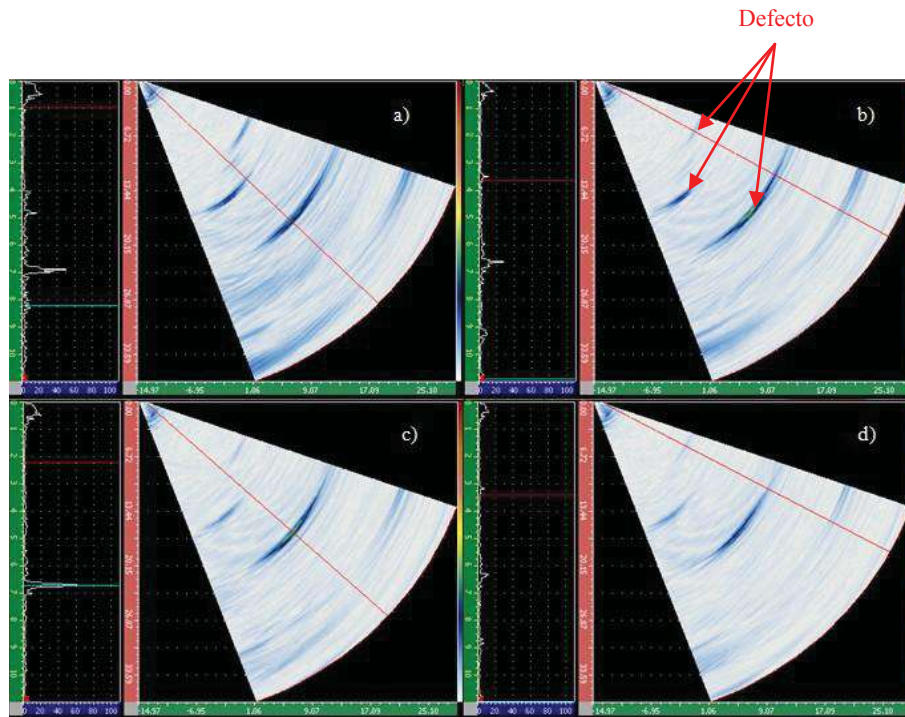


Figura 4.14 Imágenes S-Scan de la probeta de aluminio con 4 defectos simulados inspeccionada con 10MHz de frecuencia.

La figura 4.14 nos muestra las imágenes obtenidas en la inspección ultrasónica con arreglo de fases a la probeta de aluminio con defectos simulados. La figura 4.14b nos muestra la imagen S-Scan del segundo defecto que tiene un diámetro de 6.35 mm y la misma dimensión en profundidad. Podemos apreciar en la imagen la disminución en la relación ruido señal y en la intensidad de las indicaciones debido al uso de una frecuencia más alta, aunque podemos seguir apreciando las tres indicaciones construidas por la interacción del haz ultrasónico con el defecto.

4.4.2.4 Probetas soldadas de acero al carbón.

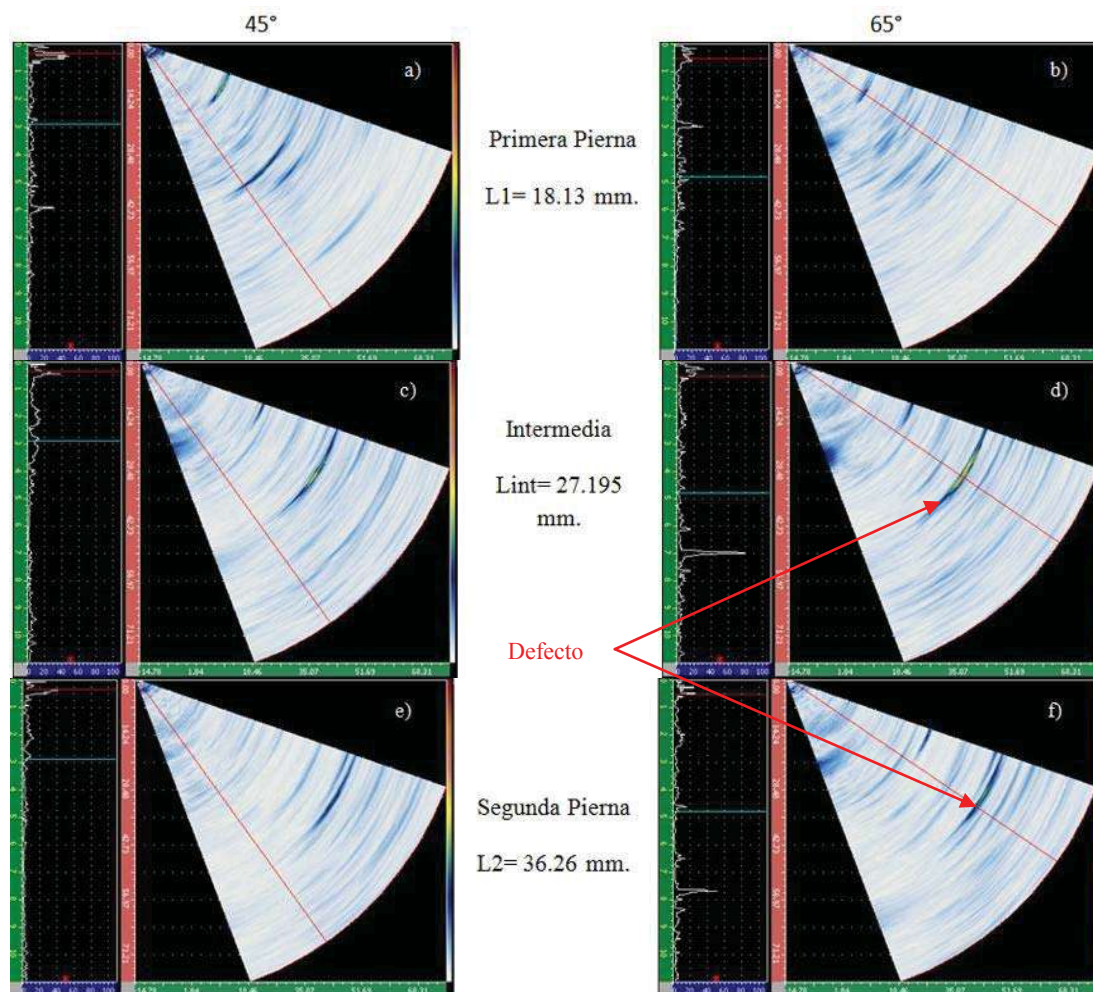


Figura 4.15 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero A572 a tope para las distancias L1, Lint y L2 utilizando ángulos de 45° Y 65° respectivamente y una frecuencia de 5 MHz.

La figura 4.15 nos muestra la inspección ultrasónica con arreglo de fases realizada a la soldadura de acero al carbón A572 sin preparación de borde, utilizando una frecuencia de 5 MHz. Tanto en la figura 4.16d como en la figura 4.15f podemos observar la aparición de las indicaciones con intensidad alta lo que puede ser efecto del tamaño del defecto con el que esta interactuando el haz ultrasónico. En estas imágenes podemos ver el efecto de la frecuencia ya que la interacción que existe es alta con lo que pueden aparecer indicaciones falsas o irrelevantes, lo que puede llevar a dificultar la identificación de defectos dentro de la soldadura.

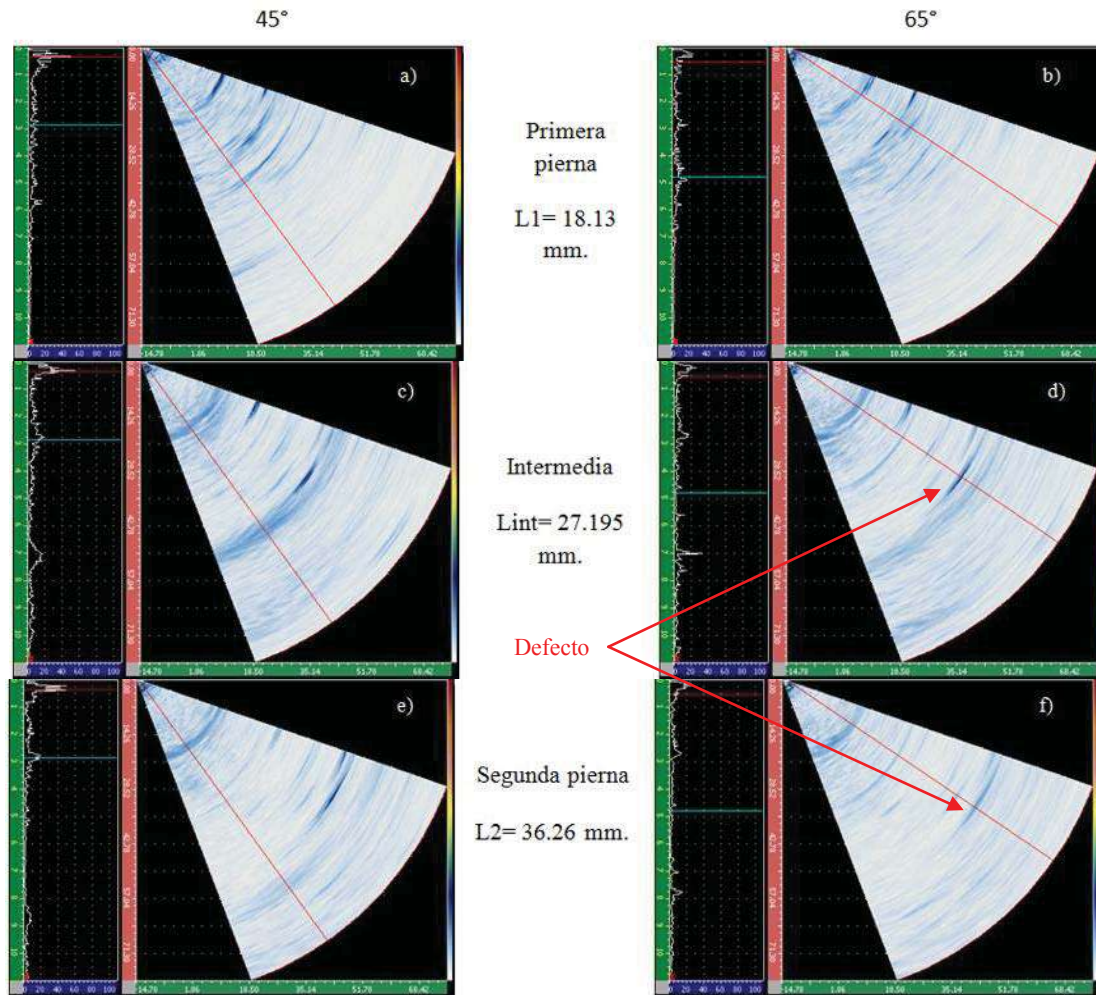


Figura 4.16 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero A572 a tope utilizando una frecuencia de 10MHz y ángulos de 45° y 65°.

La figura 4.16 nos muestra las imágenes obtenidas en la inspección ultrasónica con arreglo de fases a la soldadura de acero al carbón A572 sin preparación de borde. Esta inspección se realizó con una frecuencia de 10 MHz por lo que se puede ver en las figuras 4.16d y 4.16f podemos observar el efecto de la utilización de esta frecuencia ya que se observa una disminución en el ruido de fondo, pero también se puede observar una mayor dificultad para la detección de defectos de soldadura, esto se puede atribuir tanto a la frecuencia como a la naturaleza del material con el que está construida la soldadura, es decir su elevada impedancia acústica.

4.5 Efecto de la morfología de los defectos sobre las imágenes y señales del arreglo de fases.

Cuando las heterogeneidades tienen una forma muy grande y regular, se puede obtener de su eco o de una imagen S-Scan suficientes datos para la determinación de sus características, basándose en conceptos geométricos-ópticos. Lo más frecuente es que las heterogeneidades naturales sean tan pequeñas que den lugar a fenómenos de interferencia, estos fenómenos dependen del tamaño del obstáculo respecto a la longitud de onda, por lo que al referirnos a tamaños grandes o pequeños lo haremos sobre la base de su comparación con la longitud de onda.

Las heterogeneidades naturales pueden ser de morfología muy irregular y compleja, por lo que no es fácil determinar su tamaño. No obstante, en primera aproximación se puede asimilar a una discontinuidad en forma de disco perpendicular al haz de ultrasonido, en cuyo caso los cálculos se simplifican. Dado que las heterogeneidades naturales presentan superficies irregulares y rugosas y que no siempre su superficie reflectante principal es perpendicular al haz ultrasónico, darán lugar en la práctica, a ecos menores que un obstáculo en forma de disco circular de igual superficie. La configuración geométrica de la heterogeneidad es importante en cuanto influye sobre la cantidad de energía reflejada y en consecuencia sobre la altura y forma de la indicación del eco. Así, una heterogeneidad de tipo esférico y de superficie rugosa, puede pasar desapercibida a determinada frecuencia a causa de la dispersión de energía que provoca.

4.5.1 Heterogeneidad de morfología plana.

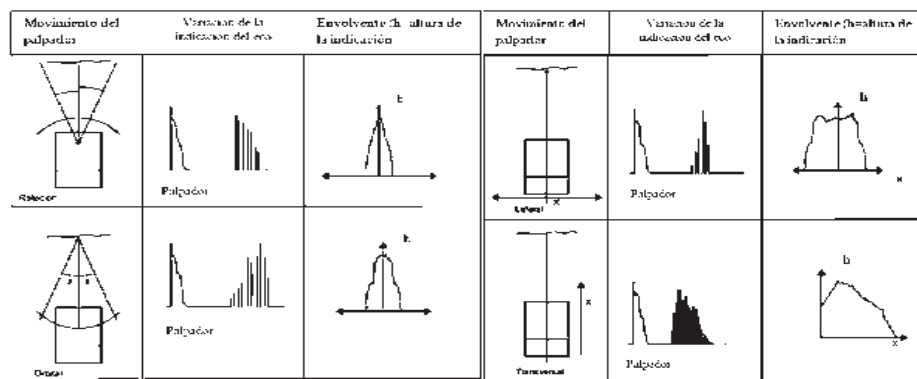


Figura 4.17 Efecto de la morfología de las discontinuidades en las señales A-Scan.

4.5.2 Heterogeneidad de morfología cilíndrica.

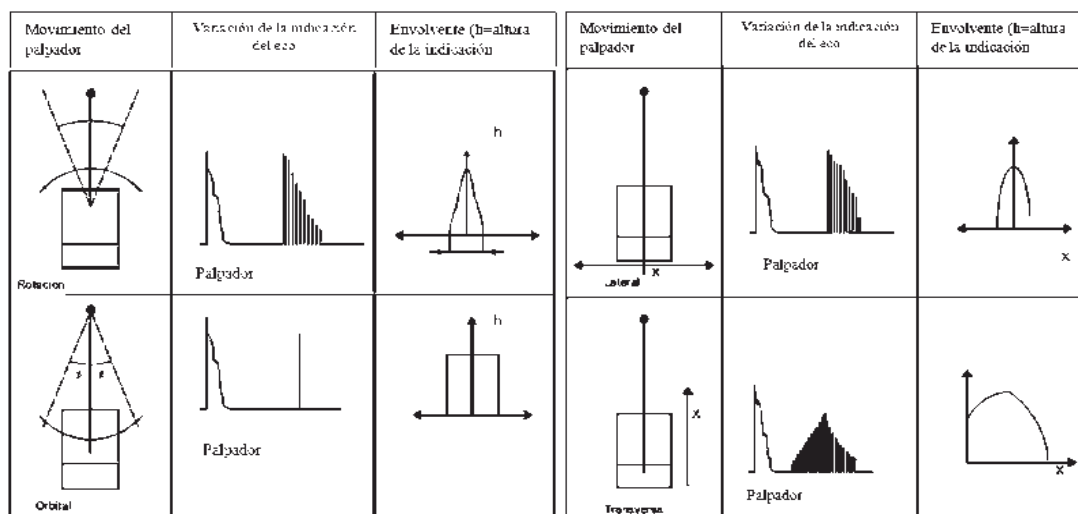


Figura 4.18 Efecto de la morfología cilíndrica sobre la señal del eco.

Las figura 4.17 y 4.18 muestra el efecto que tiene sobre las señales A-Scan la morfología de los defectos, en este caso se muestra el efecto de la morfología plana y la cilíndrica que son dos de las más comunes que podemos encontrar en la práctica común de las inspecciones para la detección de defectos. Estas figuras también muestran el efecto de la morfología en relación al movimiento del palpador sobre la zona de inspección y cómo afectaría en la variación de la señal para identificar defectos en una inspección.

4.5.3 Imágenes S-Scan de las probetas soldadas de acero al carbón.

4.5.3.1 Probeta de acero al carbón A572 a tope sin preparación de borde.

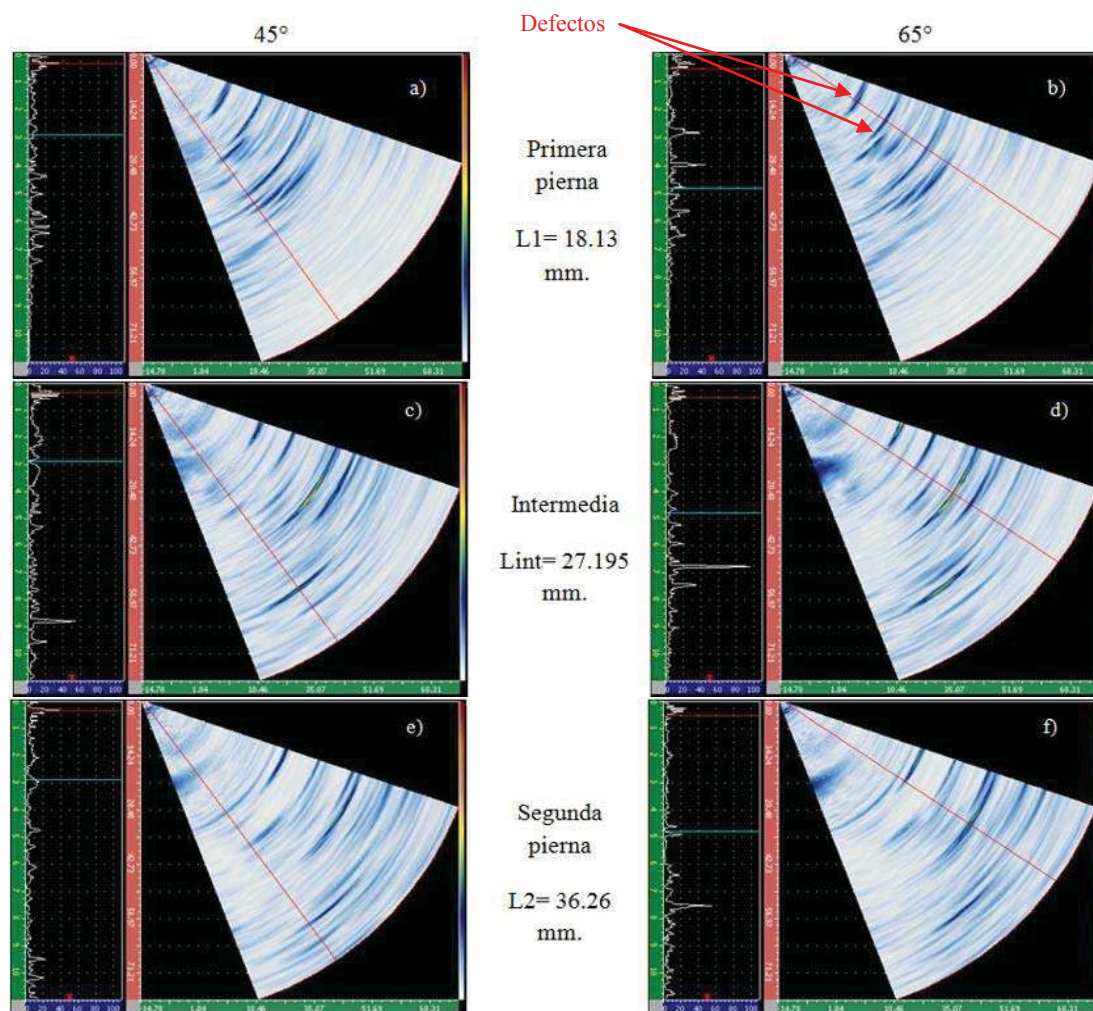


Figura 4.19 Imágenes S-Scan de la probeta soldada de acero al carbón A572 sin preparación de borde a tope, frecuencia de 5 MHz.

La figura 4.19 muestra la inspección ultrasónica con arreglo de fases a 5 MHz de la soldadura de acero al carbón A572 sin preparación de borde, con la finalidad de buscar defectos dentro de la soldadura. En la figura 4.19b se pueden apreciar dos indicaciones relevantes, mientras que sus señales A-Scan tienen la forma general de defectos con morfología plana, ya que la literatura describe que estas señales muestran un comportamiento de una base de la señal delgada y una amplitud grande similares a las observadas en esta figura. Por lo que estos defectos pueden atribuirse a grietas dentro de la soldadura o a la falta de fusión lateral.

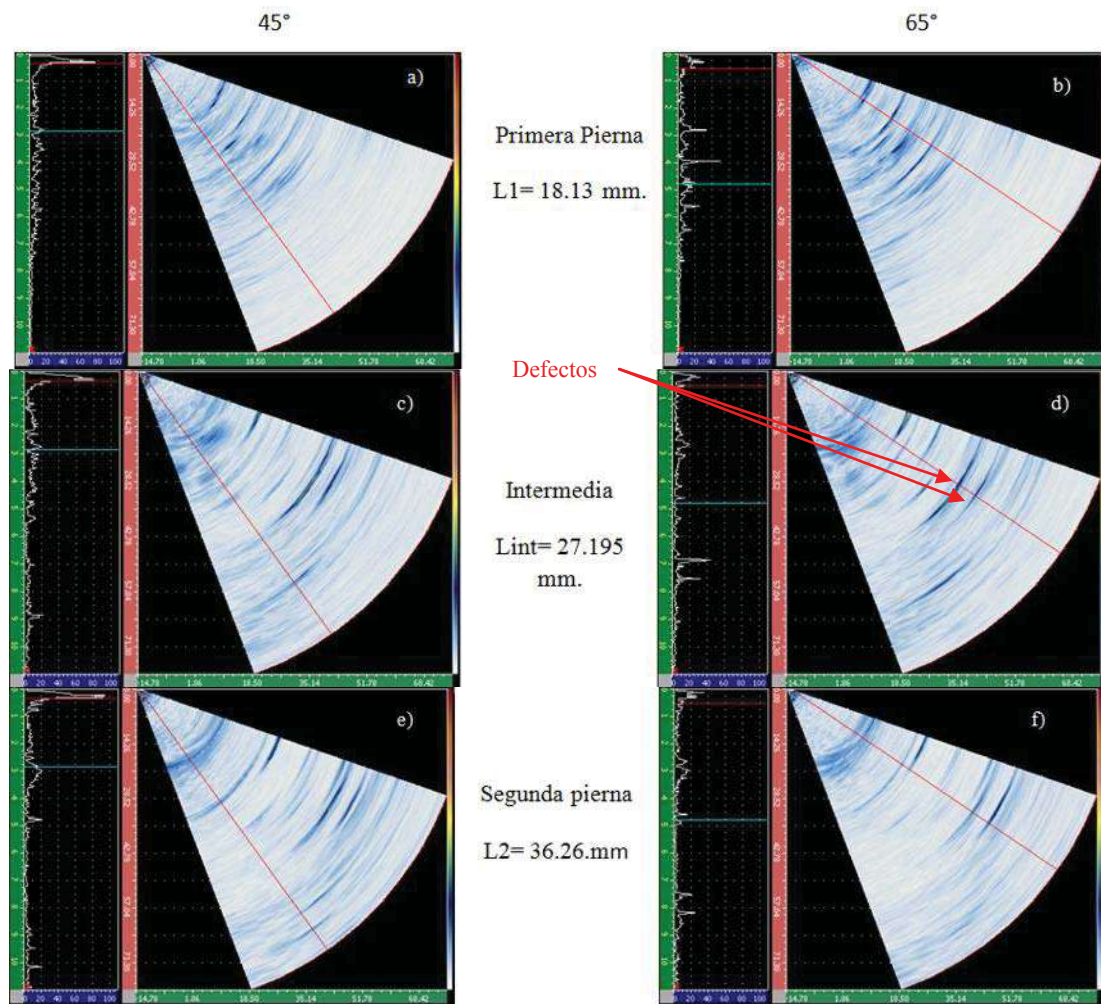


Figura 4.20 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero A572 a tope, utilizando una frecuencia de 10 MHz y ángulos de 45° y 65°.

En el caso de la figura 4.20 son imágenes obtenidas con los mismos parámetros que la soldadura anterior solo variando la frecuencia que en este caso es de 10 MHz. Y se puede observar en la figura 4.20d la existencia de indicaciones relevantes en la imagen S-Scan mientras que las señales del A-Scan pueden atribuirse al mismo origen que las descritas en la imagen 4.19.

4.5.3.2 Probeta de acero al carbón A572 en posición T sin preparación de junta.

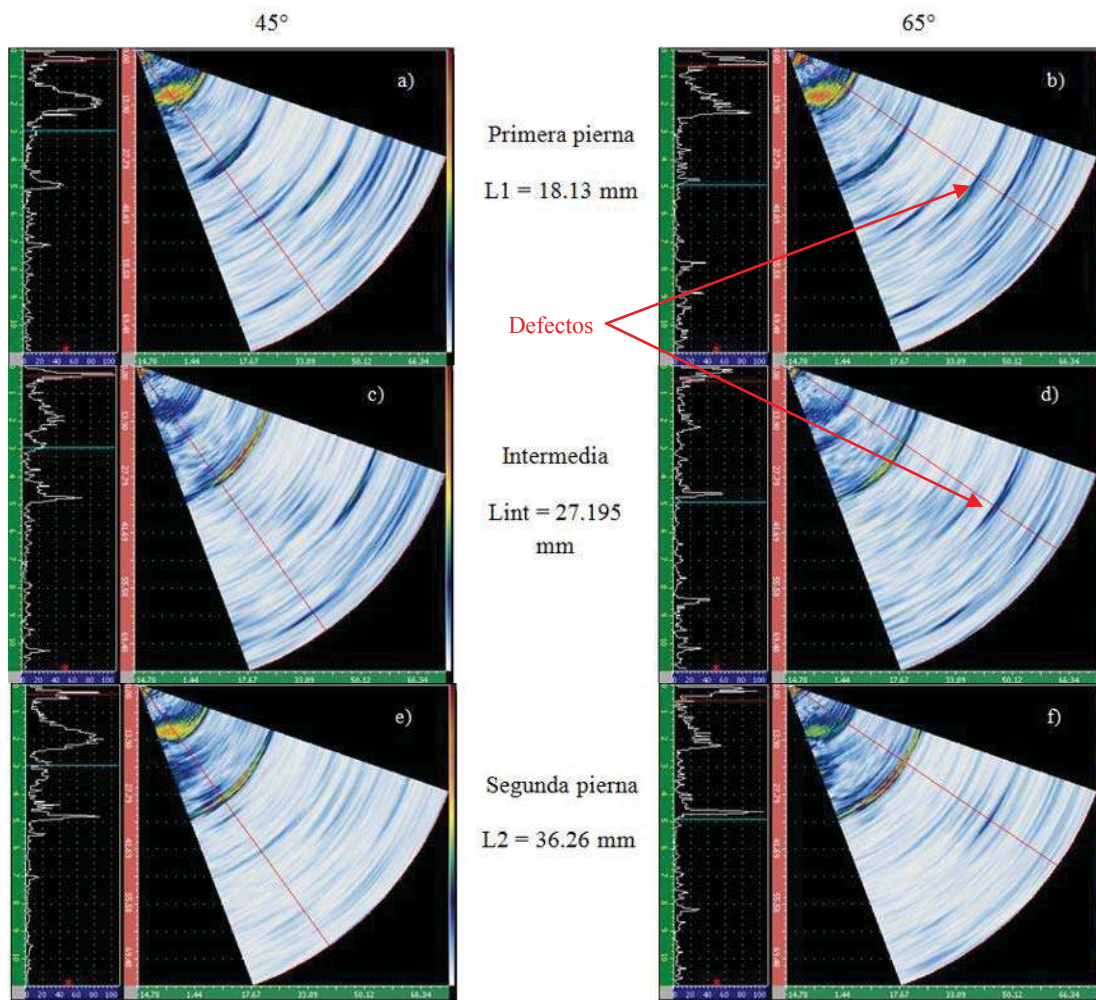


Figura 4.21 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero A572 en posición T para las distancias L1, Lint y L2 utilizando ángulos de inspección de 45° y 65° y frecuencia de 5 MHz.

La figura 4.21 muestra la inspección ultrasónica con arreglo de fases de la soldadura de acero al carbón A572 en posición T con una frecuencia de 5 MHz. En las figuras 4.21a y 4.21d se puede ver una serie de indicaciones dentro de la imagen S-Scan pero las que se referencian nos muestran señales que pueden atribuirse a un defecto dentro de la soldadura ya que sus señales A-Scan nos muestran el comportamiento general de defectos con morfología cilíndrica o esférica, por lo que se pueden atribuir estas indicaciones a defectos como escoria atrapada o porosidad.

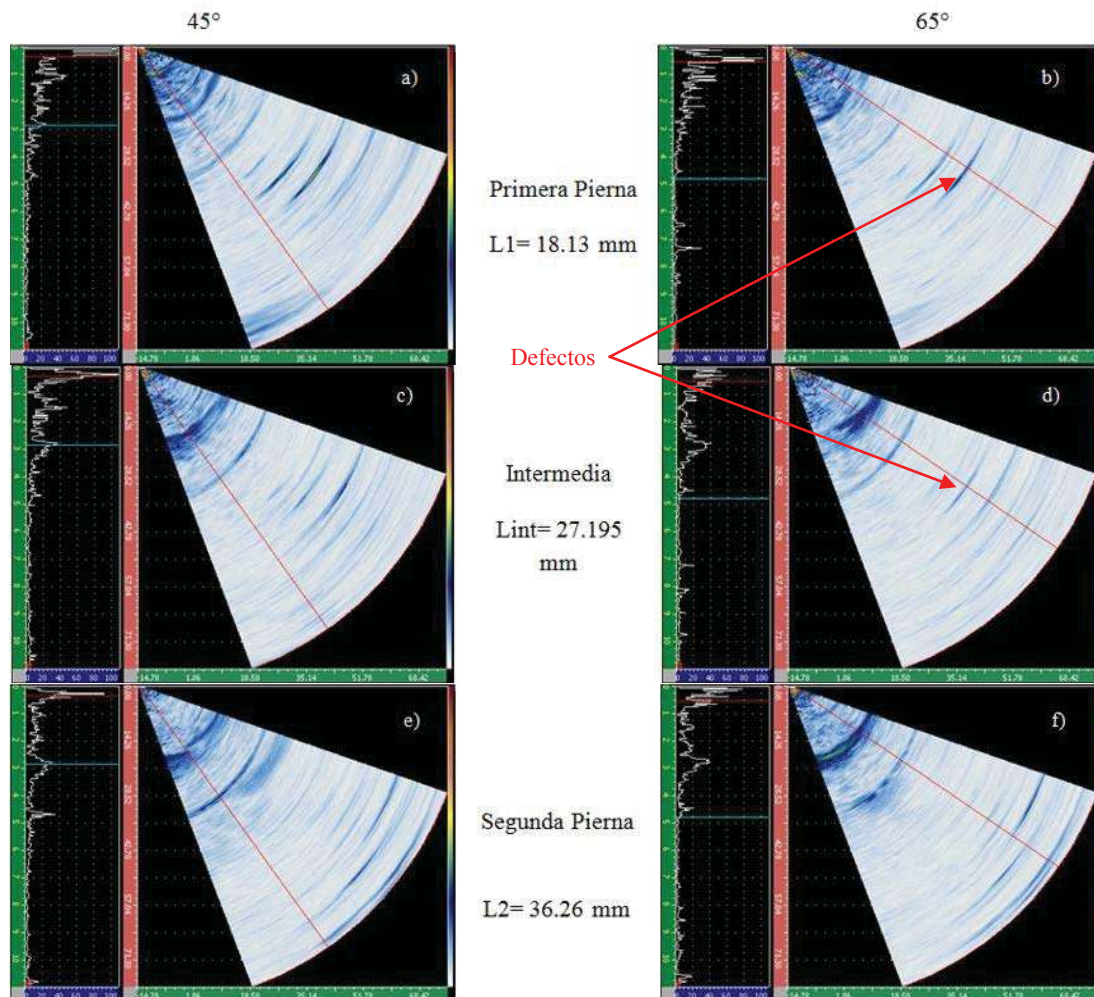


Figura 4.22 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero en posición T para las distancias L1, Lint y L2 utilizando los ángulos de 45° y 65°, frecuencia de 10 MHz.

La figura 4.22 nos muestra las imágenes obtenidas en la inspección ultrasónica con arreglo de fases a la soldadura de acero al carbón A572 en posición T con una frecuencia de 10 MHz. Al igual que en la figura anterior se pudo analizar la imágenes mediante su indicación en la imagen S-Scan y su señal en el A-Scan por lo que pueden atribuir a los defectos antes mencionados, observando que el nivel de detectabilidad en la inspección a 10 MHz aumenta.

4.6 Imágenes S-Scan de probetas de acero al carbón con preparación de borde.

A esta probeta se les realizó una preparación de borde con un ángulo de chaflán a 45° , talón de raíz de 6mm y una separación de raíz 3.175 mm. La soldadura de estas probetas se llevó a cabo con el proceso de electrodo revestido (SMAW). La figura 4.23 muestra una macrografía de la soldadura donde se pueden observar perfectamente del defectos dentro de la soldadura, el principal defecto que se detectó dentro de esta soldadura fue la falta de fusión lateral, por lo que se muestra después las imágenes obtenidas con ultrasonido con arreglo de fases y se identificó la forma de la señal A-Scan y la imagen S-Scan correspondiente a dicho defecto.

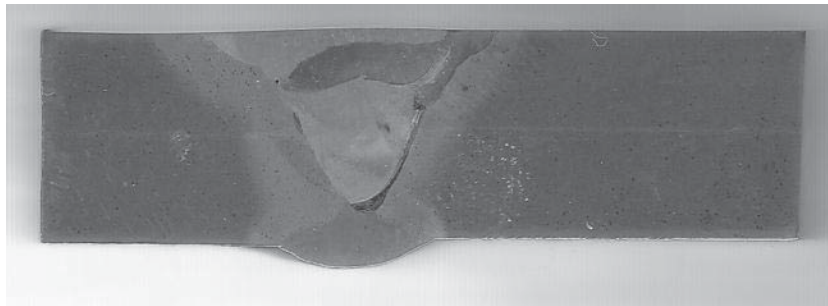


Figura 4.23 Soldadura de acero al carbón con falta de fusión lateral.

Se realizó una comparativa en las imágenes S-Scan con otra probeta la cual muestra una soldadura sana como se puede observar en la figura 4.25, esta soldadura se llevó a cabo con los mismos parámetros que la probeta antes mencionada y la misma preparación de borde. Esta soldadura no muestra un defecto aparente dentro del cordón de soldadura por lo que se observa la interacción del haz ultrasónico y su comportamiento a través de las imágenes S-Scan.

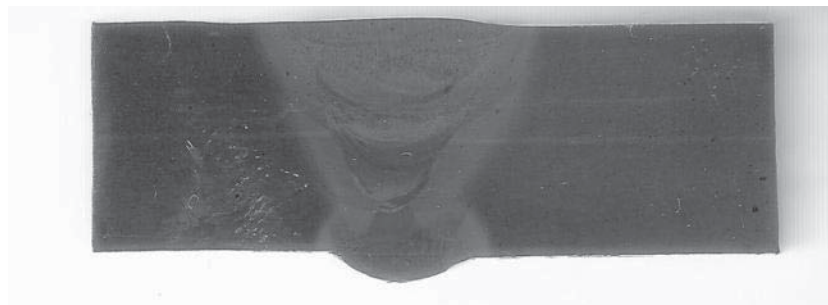


Figura 4.24 Soldadura de acero al carbón con electrodo revestido.

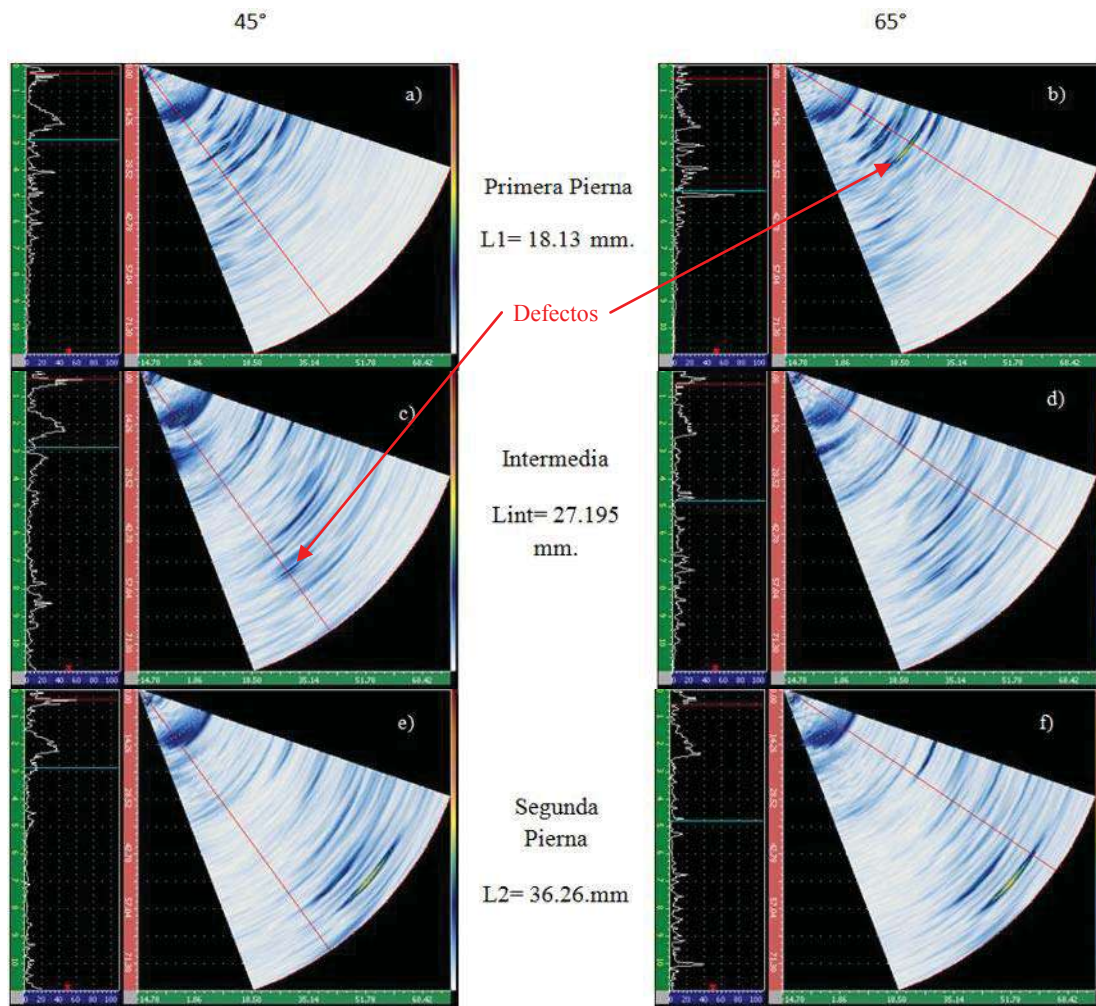


Figura 4.25 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero al carbón con preparación de borde a 5MHz.

Las figuras 4.25, 4.26, 4.27 y 4.28 nos muestran las imágenes S-Scan obtenidas de la inspección de la soldadura de acero al carbón con preparación de borde a 5 y 10 MHz de frecuencia. Se realizó una comparación entre las imágenes obtenidas con ambas frecuencias a una probeta con defectos dentro de la soldadura evidentes mediante una macrografía y las imágenes obtenidas de una soldadura sana y comparar el comportamiento de la interacción del haz ultrasónico así como de las señales en el A-Scan.

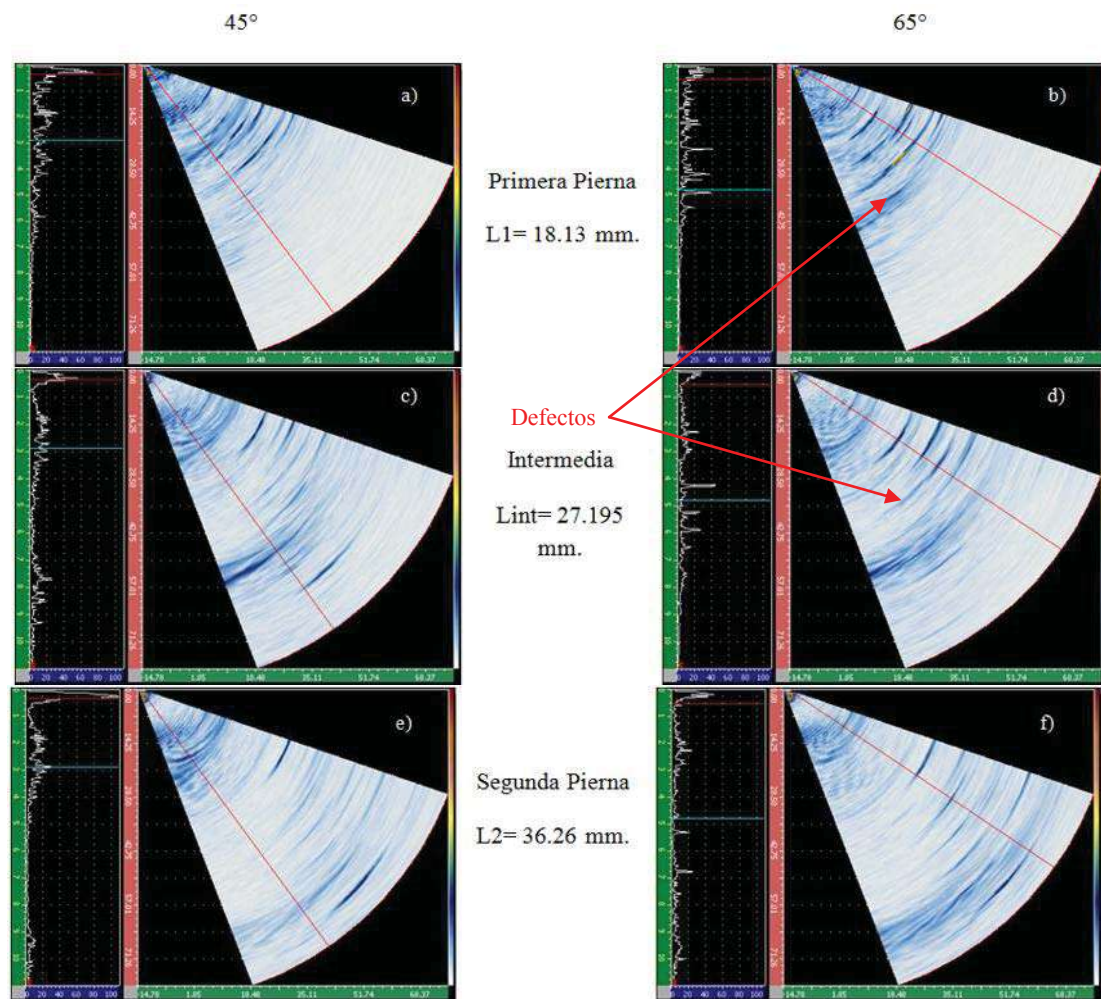


Figura 4.26 Imágenes S-Scan de la soldadura de acero al carbón con preparación de borde a 10 MHz.

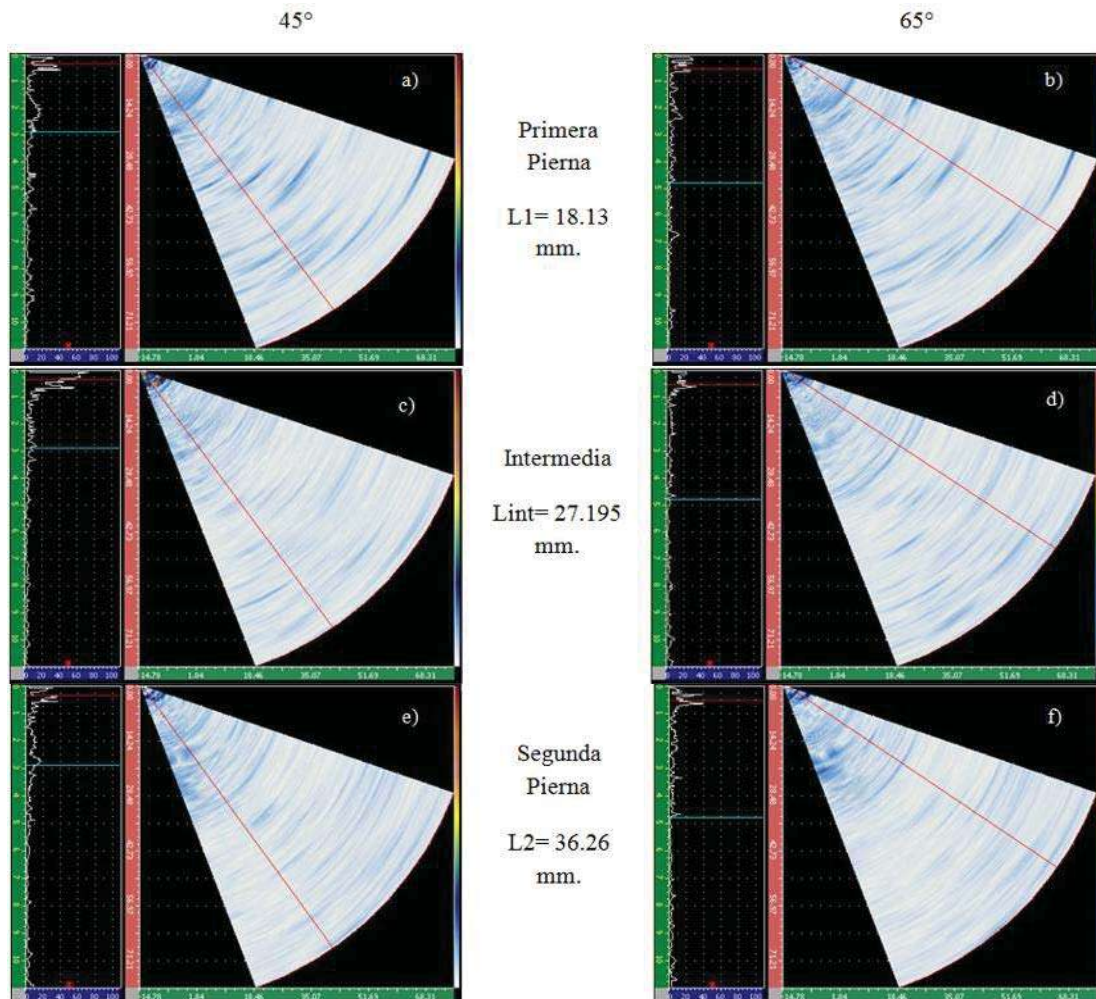


Figura 4.27 Imágenes S-Scan de la soldadura de referencia de acero al carbón con 5 MHz de frecuencia.

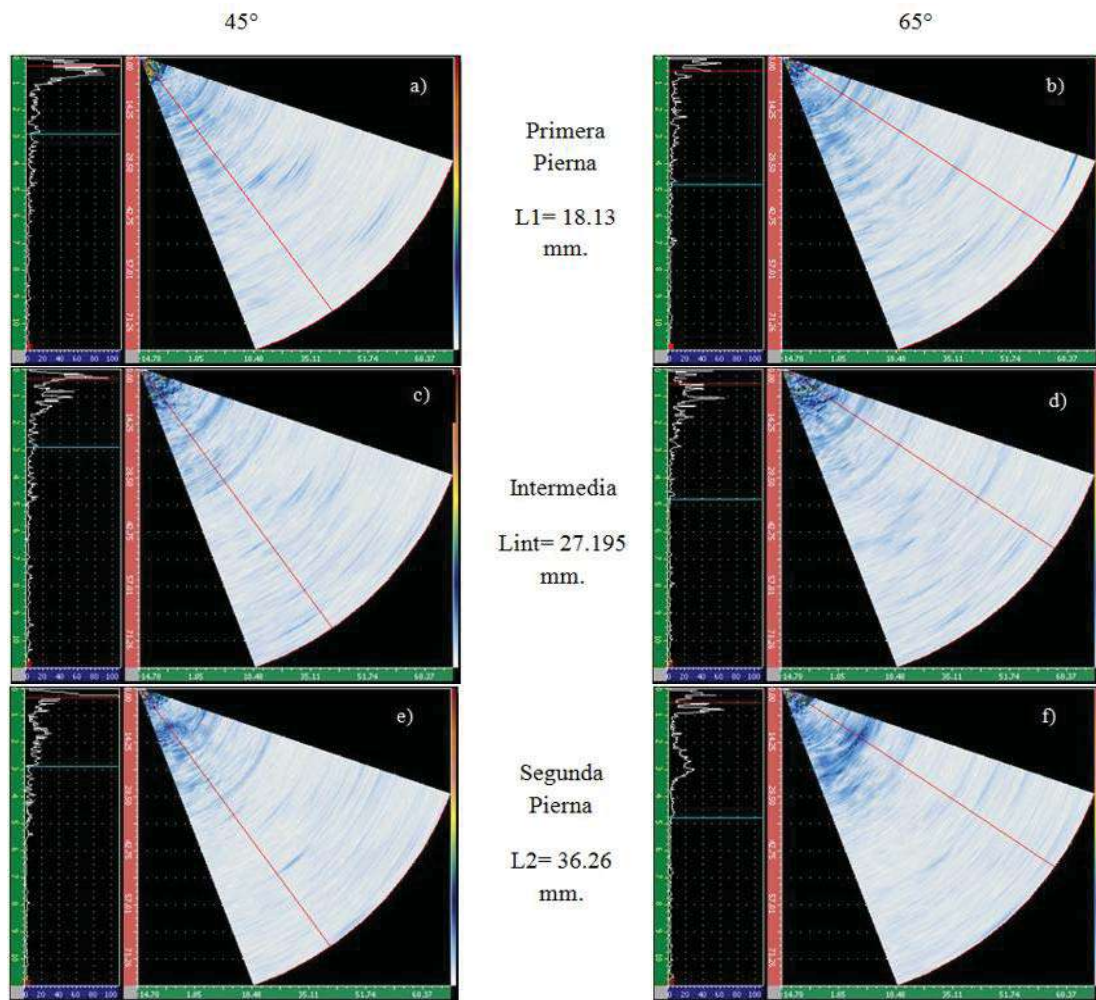


Figura 4.28 Imágenes S-Scan de la soldadura de referencia de acero al carbón con 10 MHz de frecuencia.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.

Se llevó a cabo la calibración del equipo ultrasónico de arreglo de fases para cada una de los modos que se pueden utilizar, en este caso para haz normal y haz angular. De igual forma se pudo realizar la calibración para las frecuencias de inspección utilizadas para llevar a cabo la obtención de imágenes S-Scan.

Se logró observar la influencia de la frecuencia en la inspección de probetas con defectos simulados tanto en las elaboradas con cobre como en la de aluminio, también se pudo apreciar la influencia de las diferentes configuraciones de los defectos simulados dentro de las probetas de cobre y aluminio.

Se logró elaborar una serie de probetas de soldadura que tuvieran defectos dentro del material depositado

Se pudo apreciar la forma de los defectos de soldadura en las imágenes S-Scan y se logró relacionarlas con sus señales A-Scan para poder definir a qué tipo de defecto corresponde dependiendo de la morfología del defecto, es decir, morfología plana, cilíndrica y esférica.

Se logró establecer la influencia que tiene la impedancia acústica de los materiales en relación al nivel de dificultad que se tiene al realizar las inspecciones de arreglo de fases ya que se pudo apreciar una mayor facilidad en materiales con impedancia acústica más bajas (cobre, aluminio) que en los materiales con impedancia acústica más alta (aceros microaleados, acero al carbón).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] Tubería de Acero Para Recolección y Transporte de Hidrocarburos, NRF-001-PEMEX-2007, Petróleos Mexicanos, México, D. F., 2007, pp. 16-21.
- [2] Ultrasonido Industrial Nivel II. Formulas, graficas, códigos y ejemplos. Parte No. 123-456-301. Rev. 06.01.2010. Departamento técnico, Llog S.A de C.V.
- [3] Angarita, C., P. Moewis, and L. Sáenz, *Evaluación del comportamiento mecánico de un acero microaleado X-60 laminado en frío y sometido a un tratamiento térmico de recocido*. REVISTA INGENIERÍA UC, 2003. **10**(3): p. 28-36.
- [4] Angarita, C., P. Moewis, and L. Sáenz, *Evaluación del comportamiento mecánico de un acero microaleado X-60 laminado en frío y sometido a un tratamiento térmico de recocido*. REVISTA INGENIERÍA UC, 2003. **10**(3): p. 28-36.
- [5] Vargas-Arista, B., et al., *Degradación de la tenacidad al impacto durante el envejecimiento acelerado de soldadura en acero microaleado*. Revista de metalurgia, 2008. **44**(6): p. 485-492.
- [6] Natividad, C., et al., *Metallurgical Characterization of Weld Beads of API X-60 and X-65 Steel Pipelines*, in *Emerging Fields in Sol-Gel Science and Technology*. 2003, Springer. p. 392-400.
- [7] Olympus NDT. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications*. Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. xvi, 394 p.
- [8] Alfonso R. García Cueto, *Ensayos No Destructivos por la Técnica de Ultrasonido Industrial Nivel II*. 2ª Edición, IMENDE A.C, 2005.
- [9] American Welding Society, *Manual de Soldadura*, 8th ed. Person Education, USA, 1996, Vol 1, pp. 192-204
- [10] Alfonso Garcia Cueto., et al., *Curso de Ultrasonido*, México CIDESI, 1985.
- [11] Olympus NDT. *Introduction to Phased array Ultrasonic Technology Applications*, R/D tech guideline. Watham,MA: Olympus NDT 2007.
- [12] Electric Power Research Institute, *NDE Characteristics of Pipe Weld Defects*, EPRI NP-1590-SR, Special Report, September 1980.
- [13] Krautkramer , Josef and Herbert Krautkramer, *Ultrasonic Testing of Materials*. 3 th. Edition, Democratic Republic of germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1983.

- [14] T. Gladman, *The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels*, 1ª edición, Ed. The Institute of Materials, Londres, Reino Unido, 1997, pp.185-211.
- [15] R/D Tech Corp. Phased Array Technical Guideline: Useful Formulas, Graps, and Examples, Waltham MA: R/D tech Corp., 2005.
- [16] Olympus NDT, Epoch 1000 series: Users Manual. Document number 910-269-EN. Waltham MA; Olympus NDT, February 2009.
- [17] American Society for Testing and Material. 1234-00 Standard Guide for Measure some Electronic Characteristics of Ultrasonic Examination Instruments. ASTM international, 2003.
- [18] Charles J. Hellier, Handbook of Nondestructive Evaluation. [en línea] disponible en: http://ecmp.profittech.info/Handbook%20of%20Nondestructive%20E%20valuation_0070281211.pdf. The McGraw-Hill Companies, Inc. 2003.
- [19] American Society for Metals, Metals Handbook Nondestructive Inspection and Quality Control. 8a ed., EUA, Metals Park Oh., 1976, vol.11
- [20] X. Kleber, L. Simonet, F. Fouquet, Delnondedieu, Thermoelectric Power of a two-dimensional metal/metal composite: a numerical approach, Model. Simul. Mater sci. eng. 13(2005) 341-354.
- [21] N.K.S. Introducción al Examen de Materiales y Soldadura por medio de ultrasonido, Editorial. G.A.L.H tercera revisión (1983), p. 219-222, 270-272,
- [22] B. Pinheiro, J. Lesage, I. Pasqualino, N. Benseddq, E. Bemporad, X-Ray Diffraction Study Of Microstructural Changes During Fatigue Damageinitiation In Steel Pipes,
- [23] Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios, Subcomité Técnico de Normalización DE Pemex Exploración y Producción Tubería de Acero para Recolección y Transporte De Hidrocarburos No Amargos, Tubería de Acero para Recolección y Transporte de Hidrocarburos No Amargos, No. de Documento NRF-002-PEMEX -2001, 25 de febrero de 2002.
- [24] Olympus NDT. Phased Array probes and Wedges. Document number DMAT079-01EN. Waltham ,WA: Olympus NDT, 2009. 24 p.
- [25] Davis, J.M. Advancing Ultrasonic Flaw Sizing Handbook. USA: The Art Room Corporation, 1998. 38 p.

- [26] Satyanarayan, L., et al., *Finite Difference Time Domain Simulation of Ultrasonic Phased Array Sector Scan for Imaging Cracks in Large Pipes, Elbows, and Tee Sections*. Research in Nondestructive Evaluation, 2008. **19**(2): p. 61-86.
- [27] Ciorau, P., *Contribution to detection and sizing linear defects by conventional and phased array ultrasonic techniques*. Journal of Nondestructive Testing, 2005. **10**(9).
- [28] Michael T. Anderson et al., *Through Weld Inspection Of Wrought Stainless Steel Piping Using Phased Array Ultrasonic Probes*. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, USA, 2004.

ANEXOS

ANEXO A: INSPECCIONES ULTRASONICAS DE ARREGLO DE FASES EN SOLDADURA EN LA INDUSTRIA.

INSPECCIÓN SOLDADURA EN T

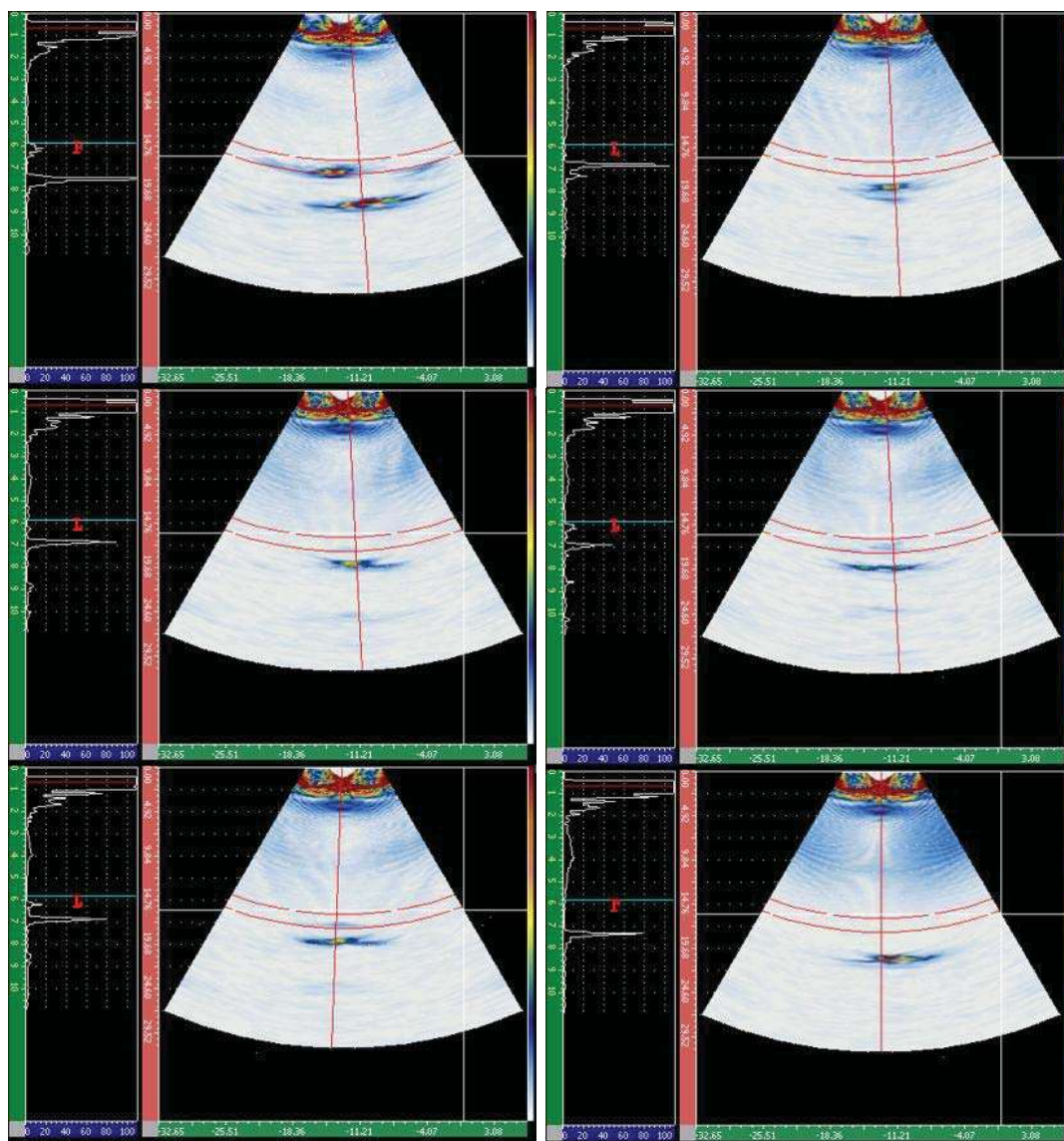
MATERIAL: ACERO A572 Gr50

ESPESOR: 16 mm

FRECUENCIA: 10 MHZ

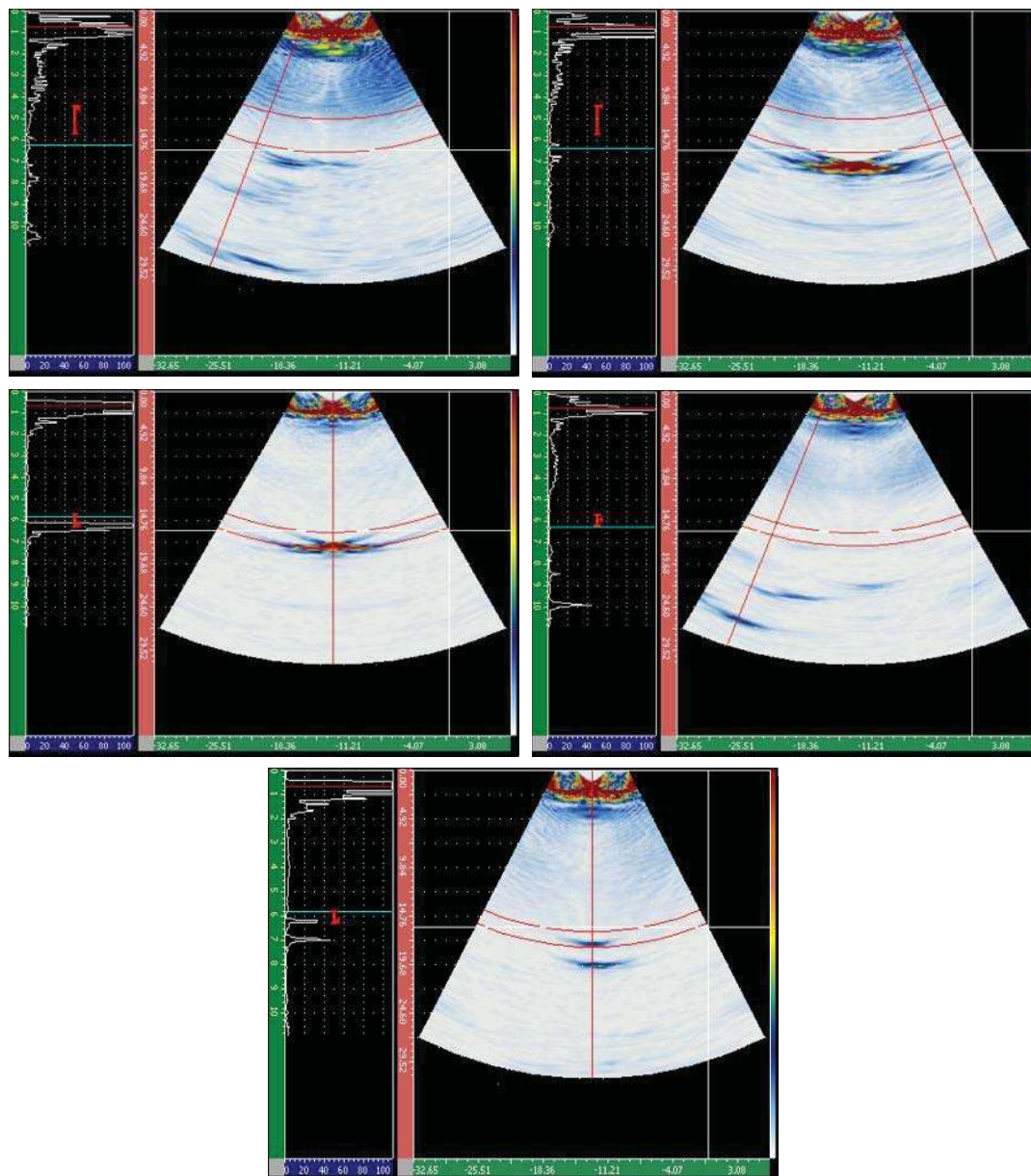
ZAPATA: NORMAL

Inspección 1



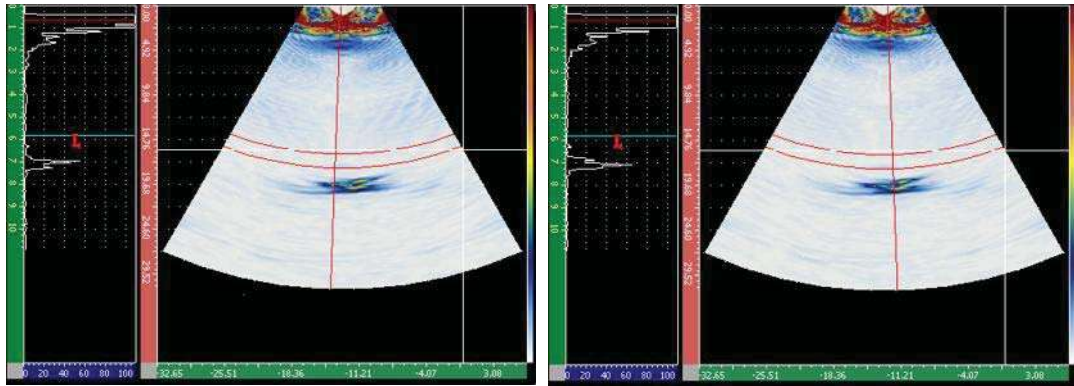
Imágenes S-Scan de la inspección de soldadura.

Inspección 2



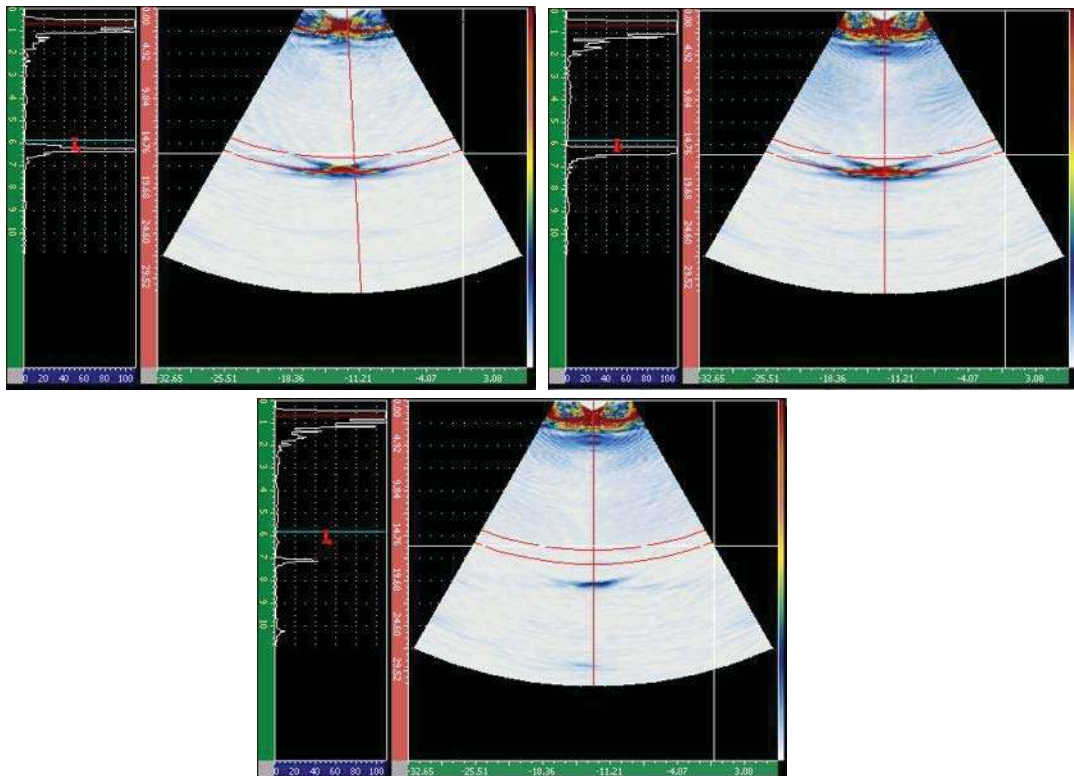
Imágenes S-Scan de la inspección realizada en la soldadura.

Inspección 3



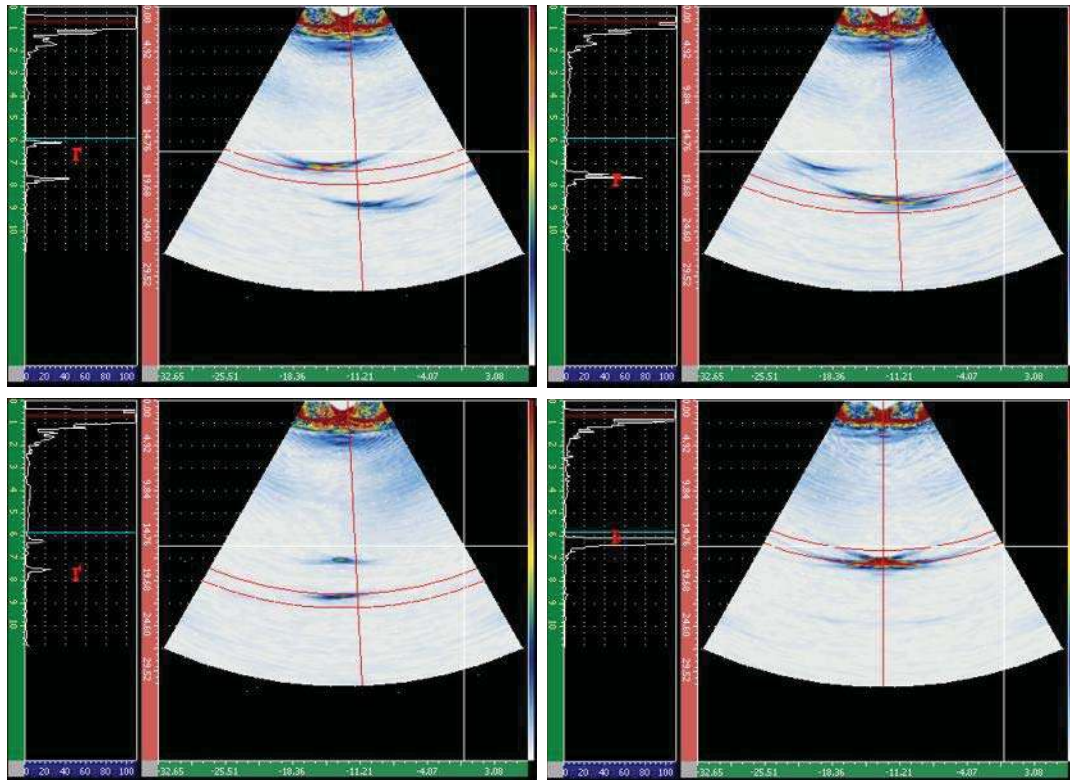
Imágenes S-Scan den la inspección de la soldadura.

Inspección 4



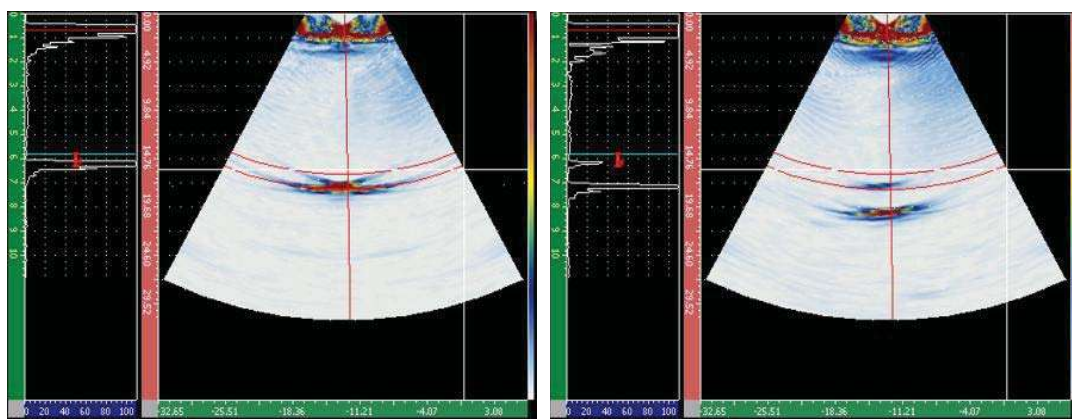
Imágenes S-Scan de la inspección.

Inspección 5



Imágenes S-Scan de la inspección sobre la soldadura.

Inspección 6



Imágenes S-Scan obtenidas en la inspección ultrasónica.

INSPECCIÓN DE SOLDADURA A TOPE CON BISEL

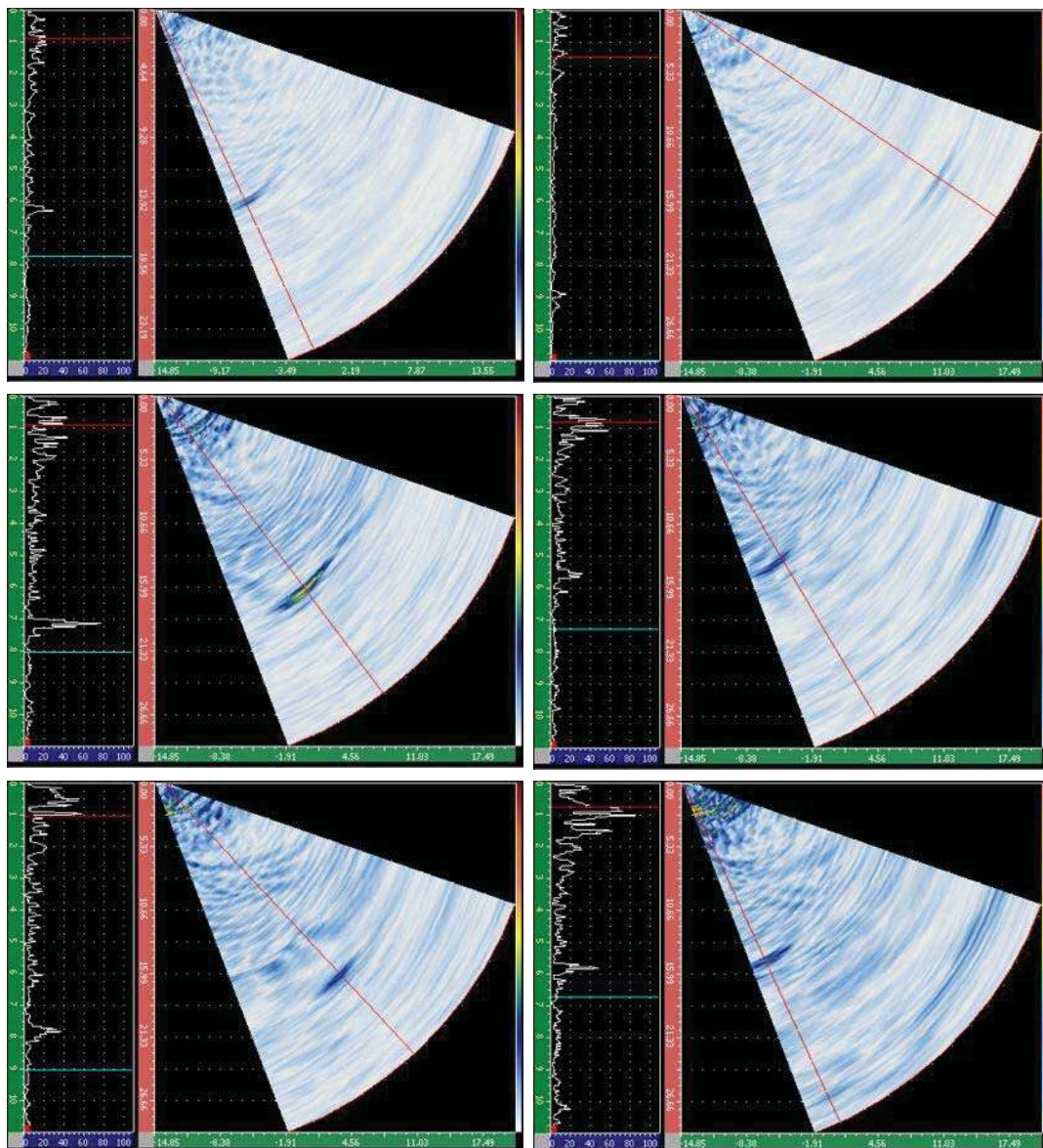
MATERIAL: ACERO A572 GR50

ESPESOR: 9.50 mm.

FRECUENCIA: 10 MHz.

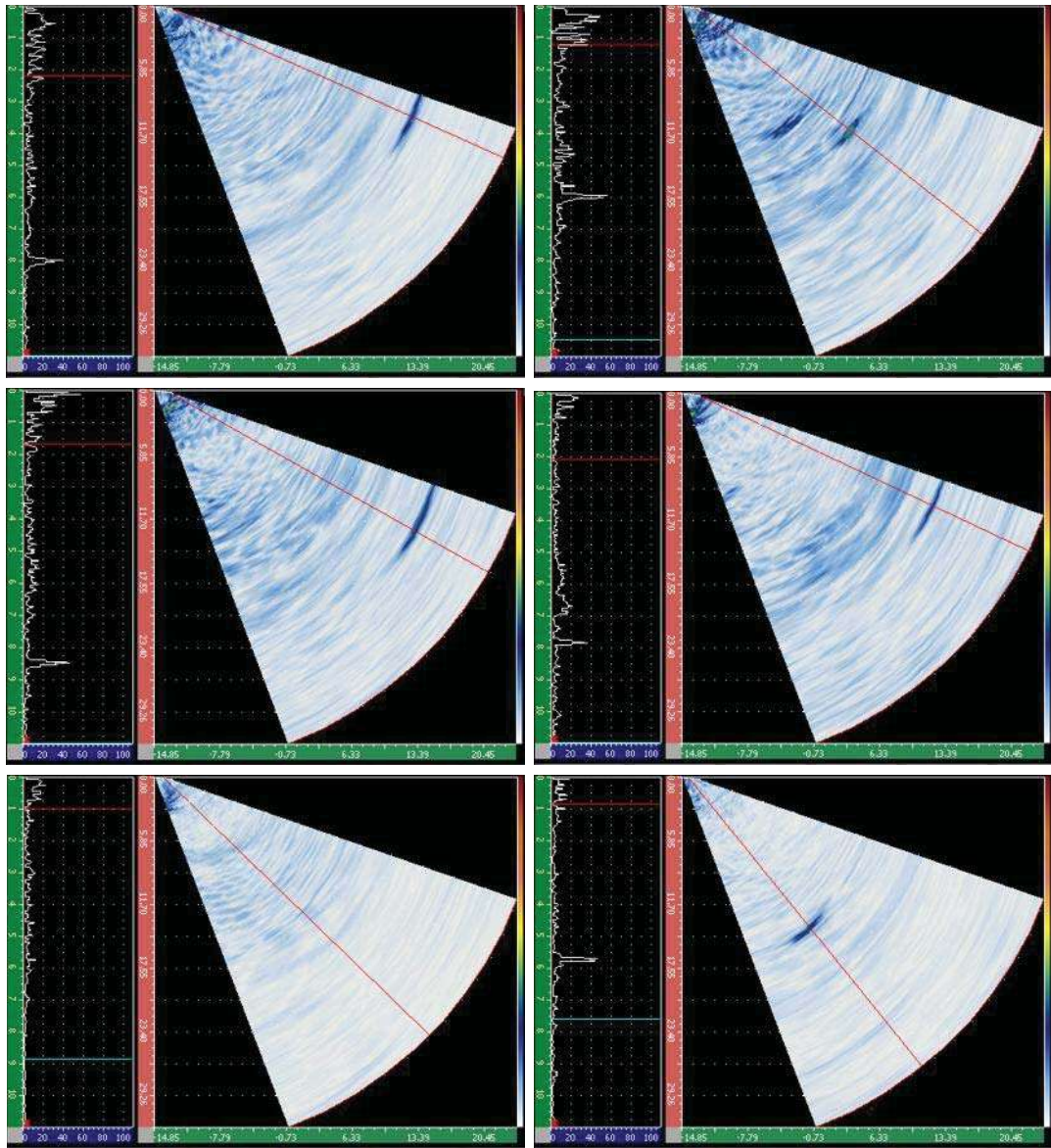
ZAPATA: ANGULAR

Inspección 1



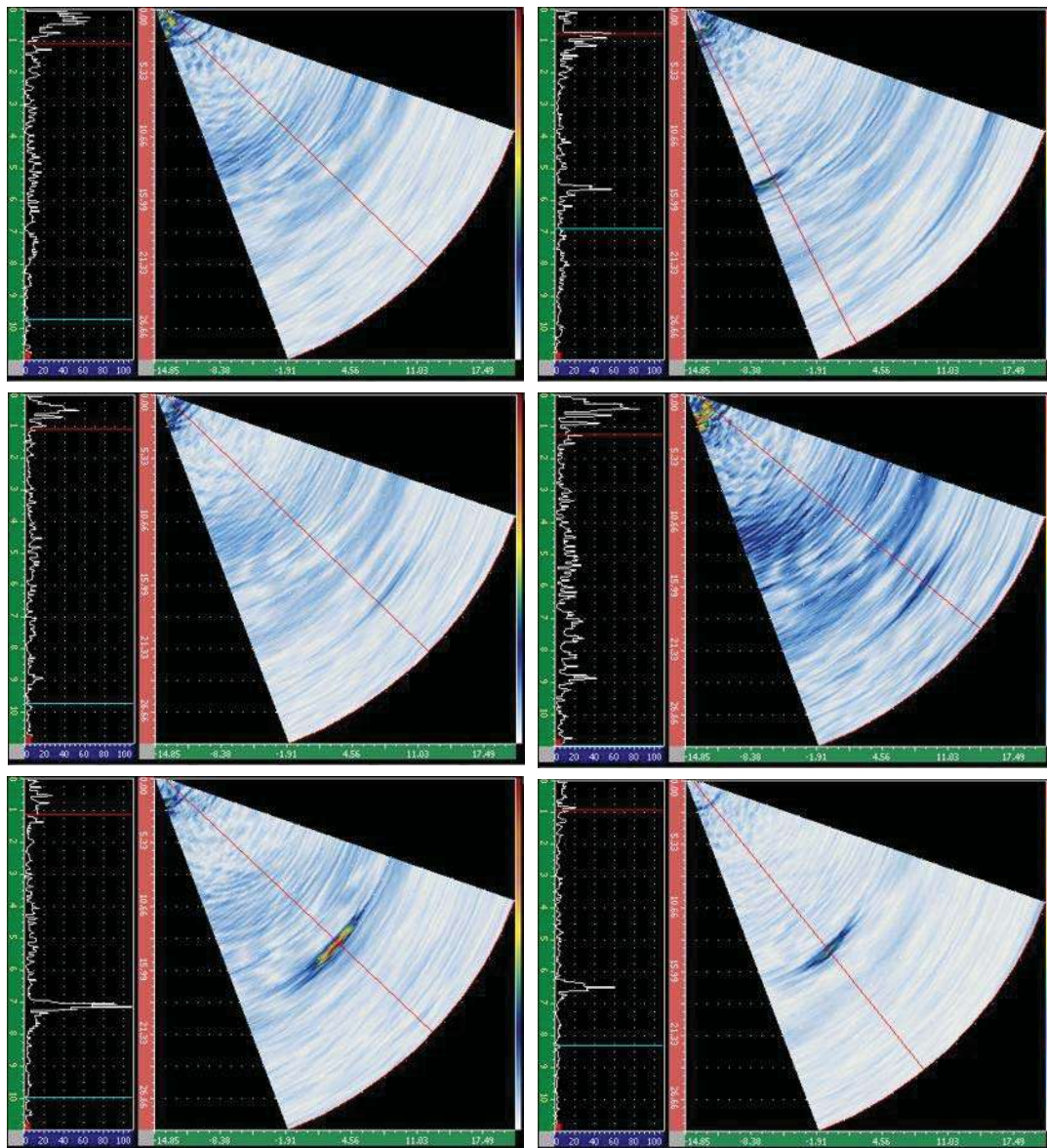
Imágenes S-Scan obtenidas en la inspección de la soldadura.

Inspección 2



Imágenes S-scan obtenidas en la inspección ultrasónica.

Inspección 3



Imágenes S-Scan obtenidas en la inspección ultrasónica con arreglo de fases.