



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“ESTUDIO Y SELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO
INDUSTRIAL PARA UNA CONFIABLE DETECCIÓN DE
DISCONTINUIDADES EN JUNTAS SOLDADAS”**

Trabajo de titulación

Tipo: Trabajo Experimental

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTOR: MANUEL MESIAS TRUJILLO CASTILLO

DIRECTOR: Ing. CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR

Riobamba-Ecuador

2021

©2021, Manuel Mesias Trujillo Castillo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Manuel Mesias Trujillo Castillo, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the left.

Manuel Mesias Trujillo Castillo.

020248170-1

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: **TRABAJO EXPERIMENTAL, ESTUDIO Y SELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO INDUSTRIAL PARA UNA CONFIABLE DETECCIÓN DE DISCONTINUIDADES EN JUNTAS SOLDADAS**, realizado por el señor: **MANUEL MESIAS TRUJILLO CASTILLO** ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Edwin Fernando Viteri Nuñez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	_____ 2021-04-01 _____
Ing. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	_____ 2021-04-01 _____
Ing. Jorge Isafas Caicedo Reyes MIEMBRO DE TRIBUNAL	_____	_____ 2021-04-01 _____

TABLA DE CONTENIDO

	Páginas.
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XV
RESUMEN.....	XVI
SUMMARY	XVII
INTRODUCCIÓN.	1

CAPÍTULO I

1	MARCO TEÓRICO	6
1.1	Ensayos no destructivos (END).	6
<i>1.1.1</i>	<i>Clasificación de los ensayos no destructivos.....</i>	<i>6</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Descripción general de los ensayos no destructivos más comunes.....</i>	<i>7</i>
<i>1.1.2.1</i>	<i>Inspección visual (VT).</i>	<i>7</i>
<i>1.1.2.2</i>	<i>Líquidos penetrantes (PT).</i>	<i>7</i>
<i>1.1.2.3</i>	<i>Partículas magnéticas (MT).</i>	<i>8</i>
<i>1.1.2.4</i>	<i>Radiografía industrial (RT).</i>	<i>8</i>
<i>1.1.2.5</i>	<i>Ultrasonido industrial (UT).....</i>	<i>9</i>
1.2	Fundamentos teóricos del ultrasonido industrial.	9
<i>1.2.1</i>	<i>Principios básicos.</i>	<i>9</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Principios físicos.</i>	<i>10</i>
<i>1.2.2.1</i>	<i>Ondas mecánicas.</i>	<i>10</i>
<i>1.2.2.2</i>	<i>Características generales de una onda mecánica.</i>	<i>10</i>
<i>1.2.2.3</i>	<i>Tipos de ondas.</i>	<i>11</i>
<i>1.2.2.4</i>	<i>Impedancia acústica.</i>	<i>15</i>
<i>1.2.2.5</i>	<i>Coeficientes de transmisión y reflexión.</i>	<i>15</i>
<i>1.2.2.6</i>	<i>Incidencia angular.....</i>	<i>17</i>
<i>1.2.2.7</i>	<i>Ley de Snell.....</i>	<i>17</i>
<i>1.2.2.8</i>	<i>Conversión de modo.</i>	<i>18</i>
<i>1.2.2.9</i>	<i>Ángulos críticos.</i>	<i>19</i>
<i>1.2.2.10</i>	<i>Atenuación ultrasónica.</i>	<i>21</i>

1.2.3	Generación y recepción de ondas ultrasónicas.	22
1.2.3.1	Efecto piezoeléctrico.	22
1.2.3.2	Golpes o fricción mecánica.	22
1.2.3.3	Efectos térmicos.	22
1.2.3.4	Procesos electrostáticos.	22
1.2.3.5	Efectos electrodinámicos.	23
1.2.3.6	Procesos magnetostrictivos.	23
1.2.4	El haz ultrasónico.	23
1.2.4.1	El principio de Huygens.	23
1.2.4.2	Zona muerta.	23
1.2.4.3	Campo cercano o Zona de Fresnel.	23
1.2.4.4	Campo lejano o Zona de Fraunhofer.	24
1.3	Palpadores ultrasónicos.	25
1.3.1	Clasificación de los palpadores ultrasónicos.	25
1.3.2	Definición de los palpadores ultrasónicos más comunes.	26
1.3.2.1	Palpador de incidencia normal o de haz recto.	26
1.3.2.2	Palpador de incidencia angular.	26
1.3.2.3	Palpador de contacto directo.	26
1.3.2.4	Palpador de inmersión.	26
1.3.2.5	Palpador de cristal único.	27
1.3.2.6	Palpador de doble cristal.	27
1.4	Métodos de inspección.	27
1.4.1	Método pulso-eco.	27
1.4.2	Método de transmisión.	28
1.4.3	Método de resonancia.	28
1.5	Soldadura.	29
1.5.1	Defectos en la soldadura según API 1104.	29
1.5.1.1	Penetración inadecuada sin desalineamiento (IP).	29
1.5.1.2	Penetración inadecuada debido a desalineamiento (IPD).	29
1.5.1.3	Penetración transversal inadecuada (ICP).	30
1.5.1.4	Fusión incompleta (IF).	30
1.5.1.5	Fusión incompleta debido a superposición fría (IFD).	31
1.5.1.6	Concavidad interna (IC).	31
1.5.1.7	Quemadura transversal (BT).	31
1.5.1.8	Inclusiones de escoria.	32

1.5.1.9	<i>Porosidad</i>	32
1.5.1.10	<i>Socavación</i>	32
1.6	Clasificación de las indicaciones en ultrasonido	32
1.6.1	<i>Indicaciones lineales</i>	32
1.6.2	<i>Indicaciones transversales</i>	33
1.6.3	<i>Indicaciones volumétricas</i>	33
1.7	Estándares de aceptación en ultrasonido	33
1.7.1	<i>General</i>	33
1.7.2	<i>Indicaciones de superficie lineal (LS)</i>	34
1.7.3	<i>Indicaciones de lineal enterrado (LB)</i>	34
1.7.4	<i>Indicaciones de línea transversal (T)</i>	34
1.7.5	<i>Indicaciones de volumétrico en grupo (VC)</i>	34
1.7.6	<i>Indicaciones de volumétrico individual (VI)</i>	35
1.7.7	<i>Indicaciones de raíz volumétrica (RV)</i>	35
1.7.8	<i>Acumulación</i>	35
1.7.9	<i>Imperfecciones de material base</i>	35

CAPÍTULO II

2	MARCO METODOLÓGICO	36
2.1	Materiales para la elaboración de las probetas	36
2.1.1	<i>Material Base</i>	36
2.1.1.1	<i>Diámetro nominal</i>	38
2.1.1.2	<i>Espesor de pared</i>	38
2.1.2	<i>Material de aporte</i>	38
2.2	Equipos y accesorios ultrasónicos	39
2.2.1	<i>Equipo de ultrasonido industrial</i>	40
2.2.2	<i>Accesorios</i>	40
2.2.2.1	<i>Accesorios para inspección por ultrasonido pulso-eco convencional</i>	41
2.2.2.2	<i>Accesorios para inspección por ultrasonido arreglo de fases manual</i>	41
2.2.2.3	<i>Accesorios para inspección por ultrasonido arreglo de fases semiautomático</i>	42
2.2.2.4	<i>Accesorios para inspección por ultrasonido TOFD</i>	43
2.2.3	<i>Bloques de referencia</i>	45
2.2.3.1	<i>Bloque de referencia IIW tipo 1</i>	45
2.2.3.2	<i>Bloque de referencia PA test block</i>	45

2.2.3.3	<i>Bloque de referencia según API 1104.</i>	45
2.3	Elaboración de las probetas de soldadura.	47
2.3.1	<i>Selección del material.</i>	47
2.3.2	<i>Corte de los carretos.</i>	48
2.3.3	<i>Preparación del biselado.</i>	48
2.3.4	<i>Armado de la junta.</i>	49
2.3.5	<i>Proceso de soldadura de la probeta.</i>	50
2.3.6	<i>Inducción de las discontinuidades.</i>	51
2.3.6.1	<i>Fisuras.</i>	51
2.3.6.2	<i>Penetración incompleta.</i>	52
2.3.6.3	<i>Falta de fusión.</i>	52
2.3.6.4	<i>Inclusiones de escoria.</i>	53
2.3.6.5	<i>Porosidad aislada y agrupada.</i>	53
2.3.6.6	<i>Socavación externa e interna.</i>	54
2.3.6.7	<i>Concavidad interna.</i>	54
2.3.7	<i>Resumen de las discontinuidades inducidas que se prevé obtener.</i>	55
2.4	Calibración de los equipos de ultrasonido.	57
2.4.1	<i>Calibración de los equipos para ultrasonido pulso-eco convencional.</i>	57
2.4.2	<i>Calibración de los equipos para ultrasonido arreglo de fases manual.</i>	59
2.4.3	<i>Calibración de los equipos para ultrasonido arreglo de semiautomático.</i>	60
2.4.4	<i>Calibración de los equipos para ultrasonido TOFD.</i>	61
2.5	Inspección ultrasónica de las juntas soldadas.	62
2.5.1	<i>Inspección mediante ultrasonido pulso-eco convencional en haz angular.</i>	62
2.5.2	<i>Inspección mediante ultrasonido arreglo de fases manual.</i>	63
2.5.3	<i>Inspección mediante ultrasonido arreglo de fases semiautomático.</i>	65
2.5.4	<i>Inspección mediante ultrasonido TOFD.</i>	65
2.6	Verificación de las discontinuidades inducidas.	66
2.6.1	<i>Ruptura de las probetas.</i>	66
2.6.2	<i>Inspección por líquidos penetrantes.</i>	67
2.6.3	<i>Compendio general de discontinuidades.</i>	70

CAPITULO III

3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.	71
3.1	Discontinuidades detectadas mediante las técnicas de ultrasonido.	71

3.2	Análisis de resultados.	72
3.2.1	<i>Relación entre discontinuidades citadas en el código API 1104 e indicaciones generadas por los ensayos de UT</i>	72
3.2.2	<i>Porcentaje de detección por tipo de discontinuidad.</i>	76
3.2.3	<i>Porcentaje de detección promedio.</i>	78
3.2.4	<i>Porcentaje de detección total.</i>	78
3.3	Discusión de resultados.	79
3.3.1	<i>Patrones característicos del haz ultrasónico.</i>	80
3.3.1.1	<i>Fisura longitudinal.</i>	80
3.3.1.2	<i>Penetración incompleta.</i>	80
3.3.1.3	<i>Falta de fusión.</i>	80
3.3.1.4	<i>Inclusión de escoria.</i>	81
3.3.1.5	<i>Porosidad aislada.</i>	81
3.3.1.6	<i>Porosidad agrupada.</i>	81
3.3.1.7	<i>Socavación externa.</i>	81
3.3.1.8	<i>Socavación interna.</i>	81
3.3.1.9	<i>Concavidad interna.</i>	82
CONCLUSIONES		88
RECOMENDACIONES		89
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1-2: Tensile Requirements for PSL 1.....	37
Tabla 2-2: PSL 1 Chemical Requirements for Heat and Product Analyses by Percentage of Weight.	37
Tabla 3-2: Chemical Composition Requirements for Solid Electrodes and Rods.	39
Tabla 4-2: Chemical Composition Requirements for Undiluted Weld Metal.	39
Tabla 5-2: Search units parameters for single zone examinations up to 3 in. (75mm).	44
Tabla 6-2: Recommended TOFD zones for butt welds up to 12 in. (300mm).	44
Tabla 7-2: Especificaciones del procedimiento de soldadura.	51
Tabla 8-2: Electrodos usados en cada pase de soldadura.....	51
Tabla 9-2: Detalle de la ubicación de las discontinuidades que se prevé inducir.	55
Tabla 10-2: Variables del ensayo de líquidos penetrantes.	68
Tabla 11-2: Discontinuidades determinadas mediante ruptura de las probetas.	69
Tabla 12-2: Resumen de las discontinuidades inducidas.	70
Tabla 1-3: Discontinuidades detectadas mediante ultrasonido.	71
Tabla 2-3: Relación entre discontinuidades citadas por el código API 1104 e indicaciones por UT.....	72
Tabla 3-3: Discontinuidades detectadas por UT.	76
Tabla 4-3: Porcentaje de detección por tipo de discontinuidad.	76

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1-3: Capacidad de detección de las técnicas de UT por tipo de discontinuidad.	77
Gráfico 2-3: Capacidad de detección promedio de las técnicas de ultrasonido.	78
Gráfico 3-3: Capacidad de detección total de las técnicas de ultrasonido.	79

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1: Clasificación de los ensayos no destructivos.	6
Figura 2-1: Clasificación del sonido.	10
Figura 3-1: Ondas longitudinales o de compresión.....	12
Figura 4-1: Ondas transversales o de corte.	13
Figura 5-1: Ondas superficiales o de Rayleigh.	14
Figura 6-1: Ondas de placa o de Lamb.	14
Figura 7-1: Incidencia normal.	16
Figura 8-1: Incidencia angular.	16
Figura 9-1: Elementos de una incidencia angular.	17
Figura 10-1: Conversión de modo.	18
Figura 11-1: Primer ángulo crítico.	19
Figura 12-1: Segundo ángulo crítico.	20
Figura 13-1: Atenuación ultrasónica.	21
Figura 14-1: Penetración inadecuada sin desalineamiento.	29
Figura 15-1: Penetración inadecuada debido a desalineamiento.	30
Figura 16-1: Penetración transversal inadecuada.	30
Figura 17-1: Fusión incompleta.	30
Figura 18-1: Fusión incompleta debido a superposición fría.	31
Figura 19-1: Concavidad interna.	31
Figura 1-2: Equipo de ultrasonido SONATEST VEO 16:64.	40
Figura 2-2: Kit ultrasónico pulso-eco convencional.	41
Figura 3-2: Kit ultrasónico arreglo de fases manual.	42
Figura 4-2: Kit ultrasónico arreglo de fases semiautomático.	42
Figura 5-2: Kit ultrasónico TOFD.	43
Figura 6-2: Bloque de referencia IIW tipo 1.	45
Figura 7-2: PA test block.	45
Figura 8-2: Dimensiones del bloque de calibración según API 1104.	46
Figura 9-2: Bloque de calibración.	47
Figura 10-2: Verificación del espesor mediante UT.	47
Figura 11-2: Corte de los carretos.	48
Figura 12-2: Dimensiones del carrito.	48

Figura 13-2: Dimensiones del bisel.	49
Figura 14-2: Biselado de juntas en V.....	49
Figura 15-2: Armado de la junta.	50
Figura 16-2: Ejecución del proceso de soldadura.	50
Figura 17-2: Fisura.....	52
Figura 18-2: Penetración incompleta.	52
Figura 19-2: Falta de fusión.	53
Figura 20-2: Inclusión de escoria.....	53
Figura 21-2: Porosidad a) aislada b) agrupada.....	54
Figura 22-2: Socavación a) externa b) interna.	54
Figura 23-2: Concavidad interna.....	55
Figura 24-2: Posicionamiento del transductor para efectuar la curva DAC.	58
Figura 25-2: Vista A-scan – UT convencional.	59
Figura 26-2: Plan de escaneo.	60
Figura 27-2: PSC separación entre centros.	61
Figura 28-2: Desplazamiento del transductor.	62
Figura 29-2: Configuración de la pantalla del equipo para arreglo de fases.....	63
Figura 30-2: Técnica de la caída de los 6dB.....	64
Figura 31-2: Configuración de la distancia entre centros.	65
Figura 32-2: Inspección visual.....	66
Figura 33-2: Proceso de ruptura de las probetas.....	67
Figura 34-2: Inspección visual del área de corte.	67
Figura 35-2: Inspección mediante líquidos penetrantes.....	68
Figura 1-3: Concavidad interna	82
Figura 2-3: Presentación de datos ultrasonido convencional.....	84
Figura 3-3: Presentación de datos ultrasonido arreglo de fases.	85
Figura 4-3: Seccionado de un archivo digital.	86
Figura 5-3: Escoria alineada.	86
Figura 6-3: Archivo digital creado por SAUT.....	87

LISTA DE ABREVIACIONES

API	American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo)
ASME	American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)
ASNT	American Society for Non Destructive Testing (Sociedad Americana de Ensayos No Destructivos)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para ensayos y materiales)
AWS	American Welding Society (Sociedad Americana de Soldadura)
BT	Burn-Through (Quemadura transversal)
C	Cracks (Fisuras)
cm	Centímetros
CP	Cluster Porosity (Porosidad agrupada)
DAC	Distance Amplitude Correction (Corrección de la amplitud en función de la distancia)
NDT (END)	Non Destructive Testing (Ensayos No Destructivos)
ESI	Elongated Slag Inclusion (Inclusión de escoria alargada)
EU	Undercutting Adjacent to the cover pass (Socavación adyacente al pase de acabado)
FHS	Full high screen
HB	Hollow Bead Porosity (Porosidad de cordón hueco)
IC	Internal Concavity (Concavidad interna)
ICP	Inadequate Cross Penetration (Penetración transversal inadecuada)
IF	Incomplete Fusion (Fusión incompleta)
IFD	Incomplete Fusion Due to Cold Lap (Fusión incompleta por superposición fría)
in	Inches (Pulgadas)
IP	Inadequate Penetration Without High-Low (Penetración inadecuada sin desalineamiento)
IPD	Inadequate Penetration Due to High-Low (Penetración inadecuada con desalineamiento)
ISI	Isolated Slag Inclusion (Inclusiones de escoria aislada)
IU	Undercutting Adjacent to Root Pass (Socavación adyacente al pase de raíz)

LB	Linear Buried (Enterrado Lineal)
LS	Linear Surface (Superficial Lineal)
MHz	Megahertz
mm	Milímetros
MT	Magnetic particle testing (Partículas magnéticas)
P	Porosity (Porosidad)
PAUT	Phased Array Ultrasonic Testing (Ultrasonido arreglo de fases manual)
PQR	Process Qualification Report (Registro de calificación de procedimiento de soldadura)
PT	Penetrant testing (Líquidos penetrantes)
RT	Radiographic testing (Radiografía industrial)
SAUT	Semiautomatic Phased Array Ultrasonic Testing (Ultrasonido arreglo de fases semiautomático)
SMAW	Shielded metal arc welding (Soldadura por arco con electrodo metálico revestido)
T	Transverse
TCG	Time-Corrected Gain (Corrección de la ganancia en función del tiempo)
TOFD	Time of flight diffraction (Difracción del tiempo de vuelo)
UT	Ultrasonic testing (Ultrasonido industrial)
VC	Volumetric Cluster (Volumétrico Agrupado)
VI	Volumetric Individual (Volumétrico Individual)
VR	Volumetric Root (Volumétrico de Raíz)
VT	Visual testing (Inspección visual)
WPQ	Welder Performance Qualification (Registro de Calificación de Soldador)
WPS	Welding Procedure Specification (Especificación de procedimiento de soldadura)

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** PROPIEDADES ACÚSTICAS DE DIFERENTES MATERIALES.
- ANEXO B:** CLASIFICACIÓN DE LOS PALPADORES ULTRASÓNICOS.
- ANEXO C:** CUADRO MAESTRO DE PROCESOS DE SOLDADURA Y UNIÓN.
- ANEXO D:** CUADRO MAESTRO DE PROCESOS AFINES.
- ANEXO E:** ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS).
- ANEXO F:** REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (PQR).
- ANEXO G:** REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE SOLDADOR (WPQ) (1).
- ANEXO H:** REGISTRO DE CALIFICACIÓN DE SOLDADOR (WPQ) (2).
- ANEXO I:** PROPIEDADES DE TUBERÍAS API.
- ANEXO J:** CERTIFICACIÓN DEL EQUIPO ULTRASÓNICO SONATEST MODELO VEO 16:64.
- ANEXO K:** CERTIFICACIÓN INSPECTOR ASNT NDT NIVEL II (1).
- ANEXO L:** CERTIFICACIÓN INSPECTOR ASNT NDT NIVEL II (2).
- ANEXO M:** DISCONTINUIDADES DETERMINADAS POR UT CONVENCIONAL.
- ANEXO N:** DISCONTINUIDADES DETERMINADAS POR UT ARREGLO DE FASES MANUAL.
- ANEXO O:** DISCONTINUIDADES DETERMINADAS POR UT ARREGLO DE FASES SEMIAUTOMÁTICO.
- ANEXO P:** DISCONTINUIDADES DETERMINADAS POR UT TOFD
- ANEXO Q:** PATRÓN DEL HAZ ULTRASÓNICO – FISURA LONGITUDINAL.
- ANEXO R:** PATRÓN DEL HAZ ULTRASÓNICO – PENETRACIÓN INCOMPLETA.
- ANEXO S:** PATRÓN DEL HAZ ULTRASÓNICO – FALTA DE FUSIÓN.
- ANEXO T:** PATRÓN DEL HAZ ULTRASÓNICO – INCLUSIÓN DE ESCORIA.
- ANEXO U:** PATRÓN DEL HAZ ULTRASÓNICO – POROSIDAD AISLADA.
- ANEXO V:** PATRÓN DEL HAZ ULTRASÓNICO – POROSIDAD AGRUPADA.
- ANEXO W:** PATRÓN DEL HAZ ULTRASÓNICO – SOCAVACIÓN EXTERNA.
- ANEXO X:** PATRÓN DEL HAZ ULTRASÓNICO – SOCAVACIÓN INTERNA.

RESUMEN

Los avances tecnológicos que se han producido en los Ensayos No Destructivos (END), ha permitido que las empresas pongan mayor énfasis en su desarrollo, siendo el ultrasonido la técnica no destructiva volumétrica de mayor uso en la industria. El objetivo de este estudio, es determinar la técnica ultrasónica más confiable en la detección de discontinuidades en juntas soldadas, para lo cual se realizó inspecciones con las técnicas: Ultrasonido Pulso-Eco Convencional, Ultrasonido Arreglo de Fases y TOFD. Se elaboró probetas de soldadura con discontinuidades inducidas, partiendo de procesos calificados mediante la norma API 1104, estos procesos fueron realizados por soldadores calificados con estampa API, quienes en base a su experiencia lograron obtener las discontinuidades más comunes citadas en el código API 1104. Para simular un ambiente cotidiano, el inspector no tuvo conocimiento del tipo de discontinuidades que fueron inducidas en las probetas. Para inspeccionar las juntas soldadas, se utilizó el equipo SONATEST modelo VEO 16:64, que presta las facilidades para realizar las inspecciones con las distintas técnicas utilizadas en este estudio, su calibración se lo realizó bajo la inspección de un técnico ASNT nivel II. Se inspeccionó las probetas de soldadura guardando un registro de los datos, que fueron analizados y comparados estadísticamente obteniendo como resultado que la técnica de ultrasonido que mayor confiabilidad presenta es el Ultrasonido Arreglo de Fases Semiautomático con un 84% de probabilidad de detección de discontinuidades. Se recomienda tener un control exacto del posicionamiento del transductor al centro de la soldadura, para evitar que en el momento de la inspección el transductor se aleje o se acerque mucho al cordón de la soldadura y se de una mala interpretación de los ecos.

Palabras clave: <ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)>, <ULTRASONIDO INDUSTRIAL (UT)>, <TRANSDUCTOR>, <SOLDADURA>, <DISCONTINUIDADES>, <CALIBRACIÓN>, <INSPECCIÓN>.

SUMMARY

The technological advances that have occurred in Non-Destructive Testing (NDT) have allowed companies to place greater emphasis on their development, with ultrasound being the most widely used volumetric non-destructive technique in the industry. The objective of this study is to determine the most reliable ultrasonic technique in the detection of discontinuities in welded joints, for which inspections were carried out with the techniques: Conventional Pulse-Echo Ultrasound, Phase Array Ultrasound and TOFD. Welding specimens with induced discontinuities were made, starting from processes qualified by the API 1104 standard, these processes were carried out by welders qualified with API stamp, who based on their experience managed to obtain the most common discontinuities mentioned in the API 1104 code. Simulating a daily environment, the inspector had no knowledge of the type of discontinuities that were induced in the test tubes. To inspect the welded joints, the SONATEST model VEO 16:64 equipment was used, which provides the facilities to carry out inspections with the different techniques used in this study, its calibration was carried out under the inspection of an ASNT level II technician. The welding specimens were inspected, keeping a record of the data, which were analyzed and statistically compared, obtaining as a result that the ultrasound technique with the highest reliability is the Semiautomatic Phase Arrangement Ultrasound with a 84% probability of detection of discontinuities. It is recommended to have an exact control of the position of the transducer to the center of the weld, to avoid that at the time of the inspection the transducer moves too far or close to the weld bead and misinterpret the echoes.

KEYWORDS: <NON DESTRUCTIVE TESTING (NDT)>, <ULTRASONIC TESTING (UT)>, <TRANSDUCER>, <WELDING>, <DISCONTINUITY>, <CALIBRATION>, <INSPECTION>.

INTRODUCCIÓN.

Antecedentes.

En 1928 un científico soviético de nombre Sergei Y. Sokolov presentó una técnica de transmisión de ondas ultrasónicas a través del material, para la detección de discontinuidades en los metales. Mulhauser, en 1931, obtuvo una patente para utilizar ondas ultrasónicas, usando dos transductores para detectar defectos en sólidos. Los equipos detectores de fallas fueron originalmente desarrollados, basándose en el principio de la intercepción de la energía ultrasónica por discontinuidades grandes, durante el paso del haz ultrasónico. Posteriormente, esta técnica recibió el nombre de inspección a través. Este sistema de inspección presentaba ciertas limitaciones, principalmente, la necesidad del acceso en ambas superficies de la pieza inspeccionada para colocar un transductor en cada superficie. No se encontró un método práctico de inspección hasta que el Dr. Floyd Firestone (1940) y Simons (1945) desarrollaron la prueba ultrasónica pulsada, usando una técnica de pulso-eco. Inventaron un aparato empleando haces de ondas ultrasónicas pulsadas para obtener reflexiones de defectos pequeños, conocido como "Reflectoscopio Supersónico". En el mismo periodo en Inglaterra, Sproule desarrolló equipos de inspección ultrasónica en forma independiente. (López, 2009: p.15)

Poco después del término de la Segunda Guerra Mundial, los investigadores en Japón comenzaron a explorar las capacidades del diagnóstico médico del ultrasonido. El trabajo de Japón en ultrasonido era relativamente desconocido en los Estados Unidos y Europa hasta los años 50's. Los investigadores entonces presentaron sus resultados en el uso del ultrasonido para detectar los cálculos biliares, las masas del pecho y los tumores, a la comunidad médica internacional. Japón fue también el primer país en aplicar el ultrasonido de Doppler, un uso del ultrasonido que detecta objetos móviles internos tales como sangre que circula a través del corazón para la investigación cardiovascular. (López, 2009: p.16)

En el año 2012, el Ing. Jesus Martinez, inspecciona y evalúa discontinuidades en proceso de soldadura por arco sumergido (SAW) mediante la técnica de ultrasonido con arreglo de fases en aceros al carbono, recopilando información sobre el proceso de soldadura por arco sumergido, estudio del control de la calidad con inspección y evaluación mediante el ultrasonido, con esta experimentación se pudo demostrar que dentro del proceso de inspección y evaluación actual es probable evaluar discontinuidades falsas, mostrando imágenes para una fácil interpretación detección y caracterización de las discontinuidades.

En 2014, Patricia Sheilla Costa, en su tesis de post-grado “Inspeccion por ultrasonido”, logra concluir que, la inspección por ultrasonido es un método muy dependiente de la experiencia del inspector, y es frecuentemente aplicada en la industria metal-mecánica, principalmente en la inspección de soldaduras, por ser un método preciso para detectar discontinuidades internas en productos acabados o semi-acabados.

En 2015, Daniel Ly Medina, inspecciona uniones soldadas de juntas a tope de penetración completa con diseño de junta en simple “V” para un rango de espesores de 8 a 25 mm mediante el método de ensayo de ultrasonido y la técnica de arreglo de fases (phased array), el trabajo busca poder validar al ultrasonido de arreglo de fases como el método más eficaz para la inspección volumétrica, para ello se utilizó probetas calificadas, las cuales serán ensayadas mediante el ultrasonido arreglo de fases y radiografía industrial para su comparación. Pudo comprobar que la técnica de ultrasonido arreglo de fases, ha sido capaz de encontrar todas las discontinuidades de las probetas ensayadas de juntas convirtiendose en una alternativa viable para la inspección de juntas soldadas, ademas que, con una vista C-scan que es una vista de planta como la de radiografía, en comparación con las placas radiográficas tomadas tanto por Rx y Ry, tiene una mejor visualización o señal de los defectos de las probetas ensayadas.

Jaime Pérez y Diego Sucuzhañay, ese mismo año, elaboran un manual de procedimientos para la inspección en uniones a tope para tubería de acuerdo a la norma api 1104 y código ASME B31.3, con el equipo de ultrasonido olympus epoch 1000i, para lo cual realizaron la inspección de probetas de tubería y se comprobaron su validez mediante radiografía industrial. Ellos verificaron la exactitud del ultrasonido, al detectar los mismos defectos y en igual dimensión de longitud con radiografía industrial, ademas que la efectividad del ensayo ultrasónico depende directamente de la habilidad del inspector y de la correcta interpretación en la obtención de resultados.

Un año despues, Gabriel Chimarro y Juan Malitaxi, realizan una comparación entre los metodos de ultrasonido y radiografía industrial para la interpretacion y evaluacion de discontinuidades en juntas soldadas con bisel tipo V y proceso SMAW según norma AWS D1.1, en esta comparacion comprobaron que el ultrasonido arreglo de fases es una alternativa util y confiable, ya que posee igual o mayor grado de sensibilidad al momento de detectar discontinuidades en comparacion a la radiografía industrial.

En 2017, Oscar Yanchapaxi, en su trabajo de post-grado aplicó el método de ultrasonido arreglo de fases en lugar de radiografía para inspección de soldaduras de tubería de presión, aplicando el método de ultrasonido arreglo de fases para evaluar discontinuidades de soldadura presentes en tuberías de presión de acuerdo con los criterios de la norma ASME B31.3. Yanchapaxi determina que las discontinuidades encontradas mediante radiografía industrial también son visibles mediante la inspección por ultrasonido y dependiendo del tipo de discontinuidad se visualiza en diferentes contrastes y niveles de amplitud. Es así que llega a la conclusión de que el ultrasonido arreglo de fases es económicamente más rentable económicamente y no genera riesgos a la seguridad del personal ni ambiental.

Actualmente el ultrasonido ha tenido un gran desarrollo en la industria, principalmente en el campo de los ensayos no destructivos, garantizando la integridad en la elaboración de piezas y de juntas soldadas. Se puede citar tres tipos de técnicas de ultrasonido, Ultrasonido Convencional (pulso-eco), Ultrasonido Arreglo de Fases y TOFD (Time Of Flight Diffraction). Los avances realizados en esta técnica es tal que, la prueba de Ultrasonido con Arreglo de Fase puede sustituir a la radiografía de soldadura mientras mantenga su calidad en los resultados de inspección, ahorrando en costos e incrementando la confiabilidad y seguridad de los mismos.

El presente proyecto brindará a la academia e industria, una guía de comparación de las discontinuidades más comunes citados en el código API 1104 con las indicaciones generadas por las técnicas de ultrasonido, así como también, los patrones de onda característicos de cada discontinuidad y la manera de como diferenciarlos, convirtiéndose en una guía práctica a la hora de seleccionar la técnica ultrasónica idónea para la detección de discontinuidades.

Planteamiento del problema.

Los ensayos no destructivos realizados a la soldadura mediante la utilización de la técnica de ultrasonido industrial, determinan la integridad de la soldadura, por lo que es de gran importancia una correcta aplicación de la técnica de inspección, conocer las ventajas y las limitantes de este ensayo.

De los últimos avances del ultrasonido industrial aplicado a la inspección de soldadura se tiene poca información y al ser una técnica de uso común es importante tener conocimiento de cuan confiables son las técnicas de ultrasonido y la exactitud que presentan para la determinación de discontinuidades.

Con el presente estudio, se espera dar a conocer la confiabilidad de la técnica de ultrasonido industrial en la inspección de juntas soldadas, realizando una comparación entre diferentes técnicas de ultrasonido como son: Ultrasonido Convencional, Ultrasonido Arreglo de Fases y TOFD, con dichas técnicas se inspeccionará probetas de soldadura que contengan discontinuidades inducidas.

Justificación de la investigación.

Para la examinación de soldaduras mediante ensayos no destructivos, una de las técnicas más utilizadas es la radiografía industrial, misma que requiere un alto grado de seguridad industrial debido a su alto grado de peligrosidad, incrementando sustancialmente el coste del ensayo.

Una de las técnicas de inspección que ha ganado mercado es el ultrasonido industrial, que al no ser dañina para el hombre y el medio ambiente tiene una gran ventaja con respecto a la radiografía industrial, razón por la cual, grandes empresas han puesto énfasis en el desarrollo de ésta técnica.

Siendo el ultrasonido la técnica de inspección destinada a reemplazar a la radiografía industrial, es necesario conocer cuan confiable es la técnica en la detección y cuantificación de discontinuidades en la soldadura, es necesario tener en cuenta que es una técnica relativamente nueva de la cual poco se conoce su utilización y las mejoras que dicha técnica ha presentado en los últimos años.

Alcance.

En el presente proyecto se obtendrá la técnica ultrasónica que mejor identifica las discontinuidades más comunes citados en el código API 1104 en soldaduras por arco con electrodo revestido en juntas a tope con bisel en V para la unión de tuberías API 5L X60 cédula 80 con un diámetro nominal de 10in, con la finalidad de utilizarlo como guía técnica para la selección del método ultrasónico idóneo para inspección.

Objetivos.

Objetivo General

Estudiar y seleccionar la técnica de ultrasonido industrial para una mayor confiabilidad en la detección de discontinuidades en juntas soldadas.

Objetivos Específicos

- Examinar el estado del arte correspondiente al ensayo de ultrasonido, proceso de soldadura y las diferentes discontinuidades más comunes en la soldadura mediante la revisión de libros, artículos, etc.
- Calibrar adecuadamente los equipos de ultrasonido.
- Inspeccionar las probetas de soldadura utilizando las técnicas: Ultrasonido convencional (pulso-eco), Ultrasonido arreglo de fases y TOFD (Time Of Flight Diffraction).
- Identificar y cuantificar las discontinuidades de la soldadura obtenidos de las técnicas: Ultrasonido convencional (pulso-eco), Ultrasonido arreglo de fases y TOFD (Time Of Flight Diffraction).
- Analizar los resultados obtenidos de las diferentes técnicas.
- Seleccionar la técnica ultrasónica idónea para la inspección.

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se revisará los conceptos y principios básicos que rigen al ultrasonido, la generación y recepción de ondas, las características del haz ultrasónico; así también, se estudiará a los palpadores ultrasónicos y su clasificación, los métodos de inspección ultrasónica, para culminar con los conceptos de soldadura y los defectos más comunes citados en el código API 1104, de igual manera que las indicaciones en ultrasonido y su clasificación.

1.1 Ensayos no destructivos (END).

Los ensayos no destructivos son una serie de pruebas realizadas a un material con el fin de detectar fallas superficiales e internas, estas pruebas no alteran la forma geométrica, ni las propiedades físicas, químicas y mecánicas del material. La cantidad de materiales que pueden ser inspeccionados con el uso de esta técnica es muy diversa, usualmente es utilizada tanto para materiales metálicos como no metálicos. Los END son realizados bajo estándares descritos en las principales normas como AWS, ASTM, ASME y el API. (Jiménez y Bejarano, 2017: p.9)

1.1.1 Clasificación de los ensayos no destructivos.

A los ensayos no destructivos se los puede clasificar de la siguiente manera.

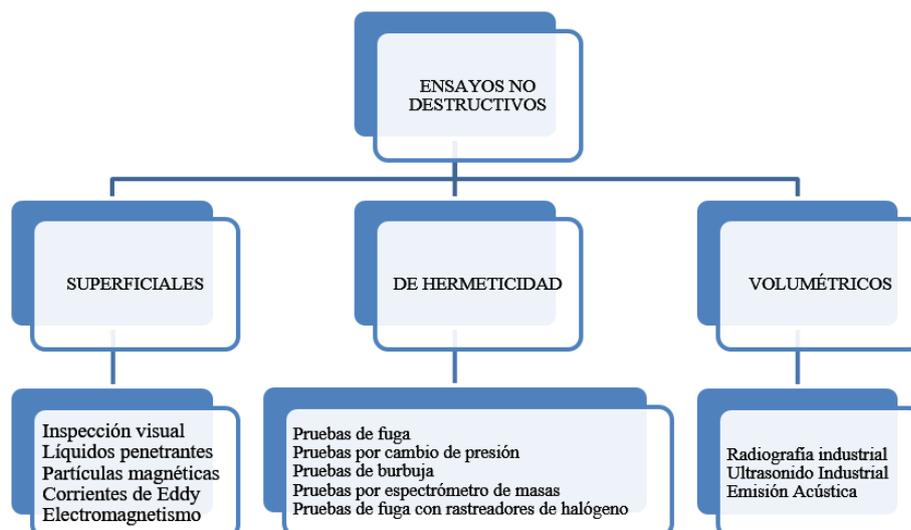


Figura 1-1: Clasificación de los ensayos no destructivos.

Fuente: (López, 2009: p.6)

Sin embargo, estos no son todos los principios disponibles para la Ingeniería de los Ensayos No Destructivos (END). La digitalización de imágenes, la termografía, la radiografía por neutrones y el análisis de vibraciones, por nombrar algunas, son técnicas utilizadas para proporcionar información, que las ya mencionadas no han podido dar, y su desarrollo en todos los niveles aún continúa. (López, 2009: p.6)

1.1.2 Descripción general de los ensayos no destructivos más comunes.

1.1.2.1 Inspección visual (VT).

Este es el método de prueba no destructiva más utilizado, y más antiguo. Actualmente, la inspección visual se encuentra entre los principales procedimientos de inspección en la detección y evaluación de discontinuidades, debido a que se considera un método simple y muy barato de aplicar. Desde sus inicios, se han desarrollado muchas técnicas difíciles y complejas, además de realizar variadas investigaciones de óptica. (López, 2009: p.8)

Durante la realización de esta actividad, el factor más importante es el ojo humano, la aplicación básica consiste en que el examinador cumpla con los requisitos de visión necesarios y cuente con una vista sana, las enfermedades tales como la miopía y el astigmatismo afectan el resultado de un examen visual. (Flores, 2009: p.5)

Para facilitar la inspección visual, es necesario el empleo de ciertos instrumentos como pueden ser: cintas métricas, reglas, falsas escuadras, calibres, galgas, equipos de medición de temperaturas o presiones, dispositivos de iluminación y medios ópticos auxiliares (comprobadores de superficies, sistemas fotoeléctricos, proyectores de perfiles, lupas y endoscopios). (Capote, 2011: p.4)

1.1.2.2 Líquidos penetrantes (PT).

La inspección por líquidos penetrantes es un tipo de ensayo no destructivo que se utiliza para detectar e identificar discontinuidades presentes en la superficie de los materiales examinados, generalmente se emplea en aleaciones no ferrosas, aunque también se puede utilizar para la inspección de materiales ferrosos cuando la inspección por partículas magnéticas es difícil de aplicar. (Rojas, 2016: p.31)

Actualmente existen 18 posibles variantes de inspección empleando este método; cada una de ellas ha sido desarrollada para una aplicación y sensibilidad específica. Así, por ejemplo, si se

requiere detectar discontinuidades con un tamaño de aproximadamente medio milímetro, debe emplearse un penetrante fluorescente, removible por post-emulsificación y un revelador seco. Por otra parte, si lo que se necesita es detectar discontinuidades mayores a 2.5 mm, conviene emplear un penetrante contrastante, lavable con agua, y un revelador en suspensión acuosa. (Castillo e Inostroza, 2013: p.6)

Los ensayos con líquidos penetrantes consisten en la aplicación de un líquido sobre la superficie del cuerpo a examinar, que penetra por capilaridad en las imperfecciones de la soldadura. Una vez limpiado el exceso, nos revelará el que ha quedado retenido en la imperfección (poros, fisuras, etc.). Existen dos tipos de líquidos penetrantes, los fluorescentes y los no fluorescentes, aunque los más utilizados son los no fluorescentes. (Capote, 2011: p.5)

1.1.2.3 Partículas magnéticas (MT).

Este método de ensayo se utiliza para la detección y localización de discontinuidades superficiales y sub-superficiales (próximas a la superficie mas no abiertas a la misma) en materiales ferromagnéticos. (Soria, 2004: p.8)

Este método involucra la magnetización de un área o componente a ser examinado y la aplicación de partículas de hierro (como medio de examen) sobre dicha superficie y componente. Las partículas son atraídas por la distorsión del campo magnético que causen las grietas o cualquier otra discontinuidad. (Flores, 2009: p.3)

Cualquiera que sea la técnica empleada para producir el flujo magnético en la pieza, la máxima sensibilidad se obtendrá con las discontinuidades lineales orientadas perpendicularmente a las líneas de flujo magnético, por lo que se requieren de al menos dos magnetizaciones perpendiculares entre sí para detectar todas las posibles discontinuidades en cada área a ser examinada. (Flores, 2009: p.3)

1.1.2.4 Radiografía industrial (RT).

Actualmente la radiografía industrial no sólo se refiere a los rayos X, sino a cualquier tipo de radiación. Hoy por hoy, estas técnicas se utilizan en diferentes ramas de la industria por su amplia versatilidad y fácil aplicación, aunque los requerimientos de seguridad son muy estrictos. (La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes, 2003: p.129)

La radiografía es un método usado para la inspección no destructiva, que se basa en la absorción diferencial de radiación penetrante por la pieza que ésta siendo inspeccionada. Debido a diferencias en las características de absorción causada por las variaciones de masa, composición y estructura del material, diferentes regiones de una misma pieza absorberán cantidades diferentes de radiación penetrante. Esa absorción diferencial de radiación penetrante podrá ser detectada a través de una película, o a través de un tubo de imagen, o la misma podrá ser medida por tipos de detectores electrónicos de radiación. Esa variación de la cantidad de radiación absorbida, detectada a través de un medio, indicará entre otras cosas la existencia de una discontinuidad interna en un material. (Aplicación y selección de ensayos no destructivos para la evaluación de uniones soldadas, 2011: p.200)

1.1.2.5 Ultrasonido industrial (UT).

Es una de las técnicas de inspección no destructiva más poderosas, ya que permite localizar y cuantificar el tamaño de los defectos internos para diferentes tipos de geometrías y materiales. En general, el procedimiento es relativamente sencillo, y no representa riesgo para el inspector o para el material. (La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes, 2003: p.89)

Un pulso de voltaje generado en el controlador ultrasónico se aplica al palpador el que produce un pulso de ondas ultrasónicas que se propagan en el objeto. La parte de las ondas que se refleja en el defecto vuelve al palpador y es mostrado en un TRC (Tubo Rayos Catódicos) como un eco. Se evalúa el defecto por la localización y amplitud del eco. (Calero, 2012: p.29)

1.2 Fundamentos teóricos del ultrasonido industrial.

1.2.1 Principios básicos.

El examen por ultrasonido consiste en el empleo de ondas mecánicas que viajan a través de un material, en el que sus partículas vibran a la misma frecuencia que las ondas sonoras con respecto a un punto fijo, sin embargo, las partículas no viajan con ellas, sino que tan solo reaccionan a su energía que es la que se mueve a través del medio. (Flores, 2009: p.10)

El ultrasonido se genera producto de vibraciones mecánicas transmitidas en un material a través de ondas de igual naturaleza que el sonido, pero estas poseen una frecuencia mayor a 20.000 ciclos/segundo (Hz). (Castillo e Inostroza, 2013: p.9)

Las ondas ultrasónicas tienen la propiedad de propagarse en la pieza y ser reflejadas parcial o totalmente por un reflector (un defecto o fondo de la pieza). Es así que por medio de este ensayo detectamos discontinuidades que a simple vista no se observa. (Calero, 2012: p.28)

1.2.2 Principios físicos.

1.2.2.1 Ondas mecánicas.

Una onda es una perturbación que avanza o que se propaga en un medio material o incluso en el vacío. A pesar de la naturaleza diversa de las perturbaciones que pueden originarlas, todas las ondas tienen un comportamiento semejante. El sonido es un tipo de onda que se propaga únicamente en presencia de un medio que haga de soporte de la perturbación. (López, 2009: p.21)

Algunas clases de ondas pueden propagarse gracias a la existencia de un medio material, y se denominan ondas mecánicas. El sonido, las ondas que se forman en la superficie del agua, las ondas en muelles o en cuerdas, son algunos ejemplos de ondas mecánicas y corresponden a compresiones, deformaciones y, en general, a perturbaciones del medio que se propagan a través suyo. Sin embargo, existen ondas que pueden propagarse aun en ausencia de medio material, es decir, en el vacío. Son las ondas electromagnéticas o campos electromagnéticos viajeros; a esta segunda categoría pertenecen las ondas luminosas. (López, 2009: p.21)

El sonido y el ultrasonido son ondas acústicas de la misma naturaleza, lo único que las diferencia es el número de oscilaciones o vibraciones que sufren las partículas del medio durante su propagación. Las aplicaciones industriales utilizan comúnmente frecuencias desde 0.5 a 25 MHz (millones de ciclos por segundo). (López, 2009: p.21)

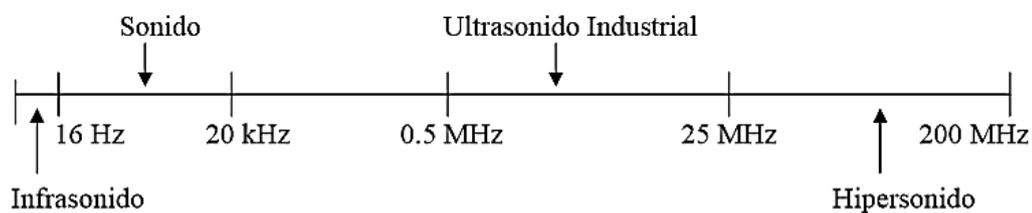


Figura 2-1: Clasificación del sonido.

Fuente: (López, 2009: p.21)

1.2.2.2 Características generales de una onda mecánica.

Amplitud (A): Es el desplazamiento máximo de una partícula desde su posición cero. (Flores, 2009: p.10)

Periodo (T): Es el tiempo que tarda una partícula en realizar un ciclo completo. (García, 2013: p.17)

Frecuencia (f): La frecuencia es, precisamente, lo que define a los ultrasonidos y los distingue de los sonidos, y corresponde al número de oscilaciones que se producen en una unidad de tiempo. (Castillo e Inostroza, 2013: p.19)

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Dónde:

f Es la frecuencia

T Es el periodo

Velocidad acústica (c): Es la velocidad a la que se propagan las ondas sonoras a través de un medio, esta depende de las propiedades del material o del medio en el que se desplaza la onda. (Jiménez y Bejarano, 2017: p.14)

Longitud de onda (λ): Es la distancia entre dos puntos donde las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento. (García, 2013: p.17)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

Dónde:

λ Es la longitud de onda

c Es la velocidad acústica

f Es la frecuencia

1.2.2.3 Tipos de ondas.

La prueba por ultrasonido está basada en el tiempo que tarda una onda ultrasónica en recorrer el espesor de un material, misma que es graficada contra la cantidad de energía que se perdió durante el recorrido. Todos los materiales que conocemos, están constituidos por pequeñas partículas elementales, llamadas átomos, los cuales pueden propagar una onda mecánica siempre que se les fuerce a vibrar dentro de sus límites de equilibrio. Las fuerzas de restauración elástica de las partículas combinadas con la inercia de las mismas partículas permiten esta

propagación. Existen diferentes modos de vibración a nivel atómico, sin embargo no todos son relevantes para la inspección ultrasónica. (López, 2009: p.23)

En los materiales sólidos existen cuatro modos principales de propagación, que son: ondas longitudinales, ondas transversales, ondas superficiales y ondas de placa. Para este caso solo se estudiará el comportamiento de las ondas longitudinales y transversales, ya que son los dos tipos de propagación comúnmente utilizados en las aplicaciones industriales. (López, 2009: p.23)

Ondas longitudinales o de compresión: Las partículas vibran en la misma dirección paralela al de propagación. Este tipo de ondas son las más fáciles de propagar y detectar, es por ello que en la técnica de ultrasonido son las más aplicadas. Pueden ser orientadas y localizadas en un haz concentrado y poseen alta velocidad. Estas son las únicas ondas que pueden ser propagadas en medios sólidos, líquidos y gaseosos. (García, 2013: p.19)

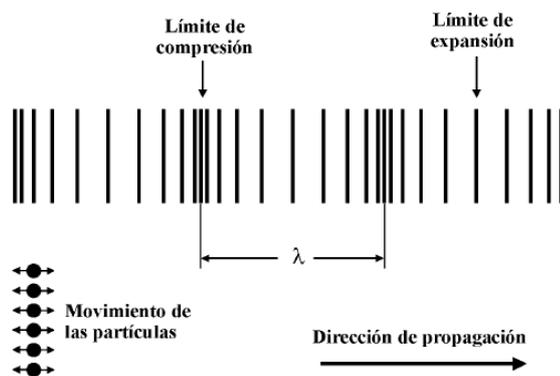


Figura 3-1: Ondas longitudinales o de compresión.

Fuente: (La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes, 2003: p.92)

La velocidad de propagación para este tipo de ondas viene dada por la ecuación:

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (3)$$

Dónde:

c_L Es la velocidad de propagación de la onda longitudinal

μ Es el coeficiente de poisson

E Es el módulo de elasticidad del material

ρ Es la densidad del material

Ondas transversales o de corte: En este tipo de ondas, el sentido de oscilación de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación. Ya que los líquidos y gases no ofrecen ninguna resistencia a los esfuerzos de corte, las ondas transversales no pueden ser propagadas en estos medios. (García, 2013: p.19)

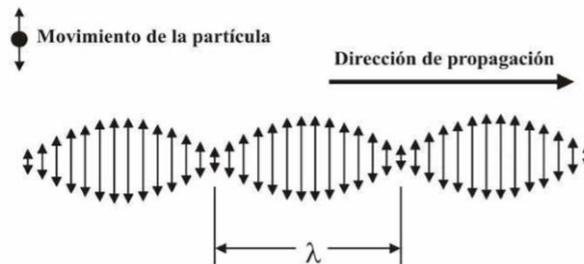


Figura 4-1: Ondas transversales o de corte.

Fuente: (La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes, 2003: p.93)

La velocidad de propagación para este tipo de ondas viene dada por la ecuación:

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4)$$

Dónde:

c_t es la velocidad de propagación de la onda transversal

μ es el coeficiente de poisson

E es el módulo de elasticidad del material

ρ es la densidad del material

G es el módulo de corte del material

Al observar estas fórmulas se puede determinar que la velocidad de propagación de una onda transversal es aproximadamente la mitad de la velocidad de propagación de una onda longitudinal, mismas que se relacionan con la siguiente fórmula.

$$c_t = c_L \sqrt{\frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)}} \quad (5)$$

Dónde:

c_t es la velocidad de propagación de la onda transversal

c_L Es la velocidad de propagación de la onda longitudinal

μ Es el coeficiente de poisson

Ondas superficiales o de Rayleigh: Son aquellas que se desplazan sobre la superficie del material y penetran una profundidad máxima de una longitud de onda, su trayectoria es elíptica y su velocidad es de aproximadamente el 90% de la velocidad de las ondas de corte. (Flores, 2009: p.14)

Las ondas superficiales o de Rayleigh se concentran en la superficie del elemento de prueba, por lo tanto, son muy sensibles a las discontinuidades superficiales; sin embargo, poseen la limitación de ser fácilmente atenuados por acoplantes, pintura o suciedad en la superficie del elemento de prueba. (Barrera y Coronel, 2011: p.21)

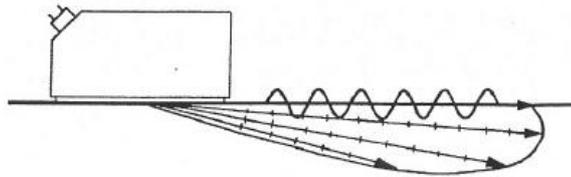


Figura 5-1: Ondas superficiales o de Rayleigh.

Fuente: (Santin, 1997 pág. 17)

Ondas de Lamb u ondas de placa: Una onda Lamb consiste en una vibración compleja que se produce en todo el espesor del material. Las características de propagación de ondas de Lamb dependen de la densidad, propiedades elásticas, y la estructura del material, así como el espesor de la pieza de prueba y la frecuencia. (Ramón, 2013: p.43)

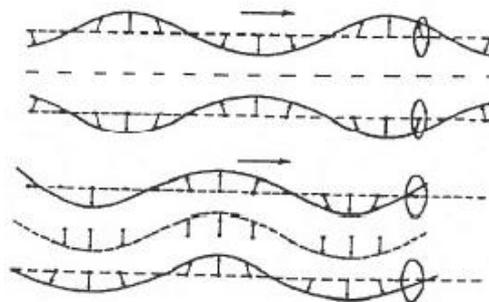


Figura 6-1: Ondas de placa o de Lamb.

Fuente: (Santin, 1997: p.20)

1.2.2.4 Impedancia acústica.

La impedancia acústica es la resistencia que opone un material a la propagación del sonido y su valor viene dado por la ecuación. (Mosquera y Sánchez, 2015: p.20)

$$Z = \rho c \quad (6)$$

Dónde:

Z Es la impedancia acústica

ρ Es la densidad del material

c Es la velocidad acústica

En el Anexo A se presenta una tabla con las propiedades acústicas de diferentes materiales.

1.2.2.5 Coeficientes de transmisión y reflexión.

Las ondas ultrasónicas se reflejan en los límites donde hay una diferencia en las impedancias acústicas (Z) de los materiales en cada lado del límite. A estos límites se les llama interfaces acústicas. Esta diferencia en las impedancias acústicas se conoce comúnmente como la unión mal hecha entre materiales. Cuanto mayor es el mal acoplamiento de los materiales, mayor es el porcentaje de energía que será reflejado en la interfaz o el límite entre un medio y otro. Cuando se conocen las impedancias acústicas de los materiales en ambos lados del límite, la fracción de la intensidad de la onda incidente que se refleja se puede calcular con la siguiente fórmula, el valor obtenido se conoce como el coeficiente de reflexión. (López, 2009: p.28)

$$R = \left[\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right]^2 \quad (7)$$

Dónde:

R Es el coeficiente de reflexión

Z_1 Es la impedancia acústica del material

Z_2 Es la impedancia acústica del material 2

Comúnmente encontraremos dos situaciones que se relacionan con la reflexión:

Cuando la onda que incide es perpendicular a la interface acústica (incidencia normal), la reflexión se presentará hacia la fuente generadora, en la misma dirección, pero con el sentido opuesto. (López, 2009: p.28)

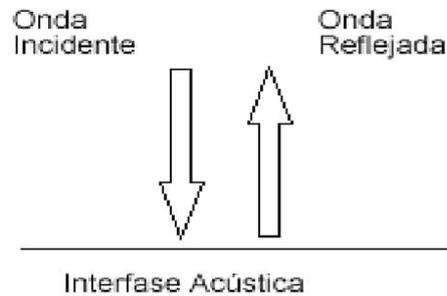


Figura 7-1: Incidencia normal.

Fuente: (López, 2009: p.28)

Cuando la onda incidente es oblicua a la interface acústica (incidencia angular), la onda se refleja con un ángulo igual al de incidencia. Porcentaje de energía reflejada. (López, 2009: p.28)

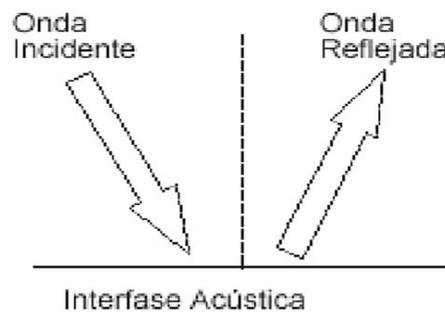


Figura 8-1: Incidencia angular.

Fuente: (López, 2009: p.28)

De la cantidad total de energía incidente una parte es reflejada, como se mostró anteriormente, y la otra parte es transmitida al segundo medio. Existe una relación entre la intensidad de la onda que es transmitida al segundo medio y el total de energía incidente. Esta relación se conoce como el coeficiente de transmisión. (López, 2009: p.28)

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (8)$$

Dónde:

R Es el coeficiente de reflexión

Z_1 Es la impedancia acústica del material

Z_2 Es la impedancia acústica del material 2

1.2.2.6 Incidencia angular.

Cuando una onda sonora longitudinal o transversal cruza oblicuamente la interfase entre dos materiales de diferente velocidad o impedancia acústica, una porción del sonido se refleja y la se refracta. Esta energía transmitida cambia su dirección de propagación de forma similar a lo que ocurre en óptica, al pasar un haz luminoso de un material a otro con diferentes índices de refracción. (Flores, 2009: p.29)

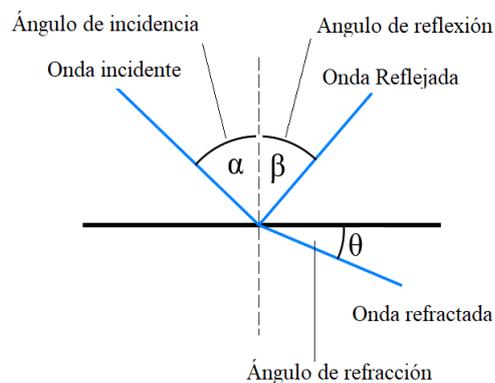


Figura 9-1: Elementos de una incidencia angular.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

1.2.2.7 Ley de Snell.

Existe una ley, similar a la aplicada en óptica, que relaciona el ángulo de la onda incidente con el de la onda refractada directamente con las velocidades del sonido en ambos medios, esta se conoce como la Ley de Snell y es aplicable a todo tipo de ondas independientemente de si se está trabajando con la componente reflejada o refractada. (García, 2013: p.24)

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \theta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (9)$$

Dónde:

c_L Es la velocidad de propagación de la onda longitudinal

μ Es el coeficiente de poisson

E Es el módulo de elasticidad del material

ρ Es la densidad del material

1.2.2.8 Conversión de modo.

Las ondas acústicas reflejadas o refractadas también pueden cambiar de modo; es decir, pasar de onda longitudinal a transversal y viceversa, dependiendo de la velocidad de la onda incidente, el material y el ángulo de incidencia. (La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes, 2003: p.100)

En la Figura 10-1 se puede apreciar como una sola onda incidente ya sea esta longitudinal o transversal da como resultado el desdoblamiento de 4 nuevas ondas que son: una onda longitudinal reflejada, una onda transversal reflejada, una onda longitudinal refractada y una onda transversal refractada.

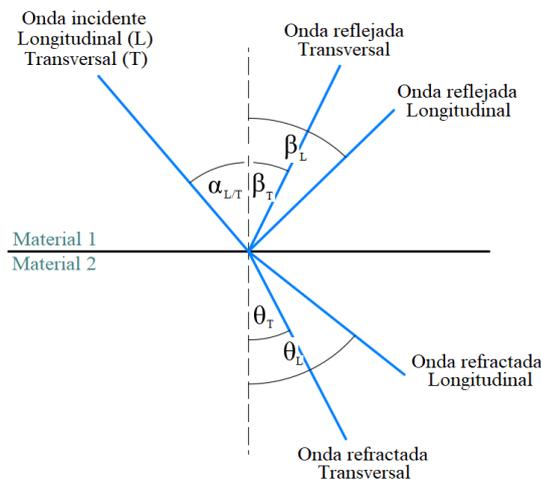


Figura 10-1: Conversión de modo.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Los distintos ángulos resultantes de estas ondas se rigen mediante la ley de Snell y vienen dados por la siguiente ecuación.

$$\frac{c_{i(L/T)}}{\sin \alpha_{(L/T)}} = \frac{c_{1L}}{\sin \beta_L} = \frac{c_{1T}}{\sin \beta_T} = \frac{c_{2L}}{\sin \theta_L} = \frac{c_{2T}}{\sin \theta_T} \quad (10)$$

Dónde:

$c_{i(L/T)}$ Velocidad de propagación de la onda incidente longitudinal o transversal

c_{1L} Velocidad de propagación de la onda longitudinal reflejada

c_{1T} Velocidad de propagación de la onda transversal reflejada

c_{2L} Velocidad de propagación de la onda longitudinal refractada

c_{2T} Velocidad de propagación de la onda transversal refractada

$\alpha_{(L/T)}$ Ángulo de incidencia de la onda longitudinal o transversal

$\sin \beta_L$ Ángulo de reflexión de la onda longitudinal reflejada

$\sin \beta_T$ Ángulo de reflexión de la onda transversal reflejada

$\sin \theta_L$ Ángulo de refracción de la onda longitudinal refractada

$\sin \theta_T$ Ángulo de refracción de la onda transversal refractada

Si $c_1 > c_2$ entonces $\beta_L = \alpha$

Si $c_2 > c_1$ entonces $\beta_T = \alpha$

1.2.2.9 Ángulos críticos.

Si dos tipos de ondas están presentes al mismo tiempo en el material sujeto a examen (con diferentes velocidades y ángulos de refracción), es prácticamente imposible evaluar de forma adecuada una discontinuidad, pues no se conoce el modo de onda que la está detectando. Por este motivo, antes del examen debe verificarse que solo exista un modo de propagación al calcular. (Flores, 2009: p.21)

Primer ángulo crítico: El primer ángulo crítico es aquel ángulo de incidencia de una onda longitudinal para obtener una onda longitudinal refractada a 90° .

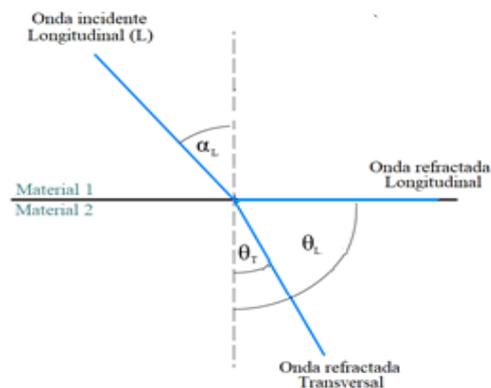


Figura 11-1: Primer ángulo crítico.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Al aplicar la ley de Snell obtenemos que:

$$\sin \alpha_L = \frac{c_{iL}}{c_{2L}} \quad (11)$$

Dónde:

c_{iL} Velocidad de propagación de la onda incidente longitudinal

c_{2L} Velocidad de propagación de la onda longitudinal refractada

α_L Ángulo de incidencia de la onda longitudinal

Segundo ángulo crítico: Al segundo ángulo crítico se lo define como aquel ángulo de incidencia de una onda longitudinal para obtener una onda transversal refractada a 90° .

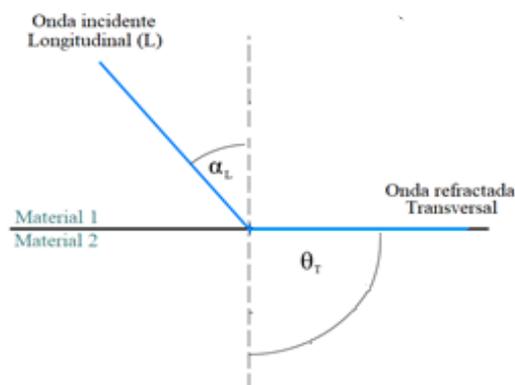


Figura 12-1: Segundo ángulo crítico.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Al aplicar la ley de Snell obtenemos que:

$$\sin \alpha_L = \frac{c_{iL}}{c_{2T}} \quad (12)$$

Dónde:

c_{iL} Velocidad de propagación de la onda incidente longitudinal

c_{2T} Velocidad de propagación de la onda transversal refractada

α_L Ángulo de incidencia de la onda longitudinal

destruictiva. La pérdida de calor es anisotrópica con respecto a la dirección de propagación de la onda, y para la mayoría de los materiales se incrementa proporcionalmente con la frecuencia. (La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes, 2003: p.108)

1.2.3 Generación y recepción de ondas ultrasónicas.

Las ondas ultrasónicas pueden ser generadas por distintos métodos como los que se detallan a continuación.

1.2.3.1 Efecto piezoeléctrico.

Fue descubierta en 1880 por Pierre y Marie Curie, quienes demostraron que algunos materiales como el cuarzo, al ser sometidos a una presión mecánica externa, producen cargas eléctricas sobre su superficie. En 1881, Lippman descubrió el efecto contrario y predijo que al aplicar una corriente eléctrica al material se produce deformación mecánica. (Flores, 2009: p.30)

1.2.3.2 Golpes o fricción mecánica.

Los golpes o la fricción mecánica aplicados a un sólido producen un sonido con un amplio espectro de frecuencias, desde el sonido audible hasta la banda de MHz. El espectro depende de la forma, el tamaño y el material de la parte donde se aplica el choque o la fricción. (Santin, 1997: p.49)

1.2.3.3 Efectos térmicos.

El calentamiento de una superficie sólida provoca una expansión rápida y localizada en el material. Las tensiones mecánicas producidas por este proceso excitan las ondas sonoras con un amplio espectro de frecuencias. (Santin, 1997: p.49)

1.2.3.4 Procesos electrostáticos.

Una fuerza actúa entre las placas de un condensador. En un condensador con placas móviles, se puede generar una onda sónica con una frecuencia de hasta 200MHz por una variación de voltaje o por un voltaje de corriente alterna. La amplitud de las vibraciones obtenidas por este proceso es, sin embargo, muy pequeña. El desarrollo de cabezales electrostáticos ha logrado resultados positivos en las pruebas de piezas de material cerámico. (Santin, 1997: p.50)

1.2.3.5 Efectos electrodinámicos.

Si un campo magnético alterno actúa junto con un material eléctricamente conductor, las corrientes de Foucault son inducidas en la pieza de prueba. por la interacción entre las corrientes parásitas y el campo magnético externo, se produce una fuerza en la pieza (fuerza de Lorentz) y genera ondas sonoras. (Santin, 1997: p.51)

1.2.3.6 Procesos magnetostrictivos.

La magnetostricción se refiere a la deformación mecánica de materiales ferromagnéticos por campos magnéticos externos. Los cabezales magnetostrictivos producen sonido con alta energía y baja frecuencia (hasta aproximadamente 100 kHz). (Santin, 1997: p.52)

1.2.4 El haz ultrasónico.

1.2.4.1 El principio de Huygens.

El principio de Huygens establece que la energía irradiada desde un punto se propaga en todas las direcciones, con el frente de onda tomando una forma esférica y su intensidad disminuyendo con el cuadrado de la distancia. Si dos fuentes puntuales de energía se colocan una cerca de la otra, habrá una combinación de los dos frentes de onda esféricos y el frente de onda formado perderá su forma esférica. (Santin, 1997: p.52)

1.2.4.2 Zona muerta.

En esta zona se hace muy difícil encontrar discontinuidades o defectos en el material, esto se debe a las interferencias producidas por las vibraciones del cristal ya que las ondas de ultrasonido se generan desde numerosos puntos en el plano del elemento piezoeléctrico. Debido a la zona muerta se produce el primer pico en el escáner de la probeta, con el fin de eliminar esta zona se utilizan elementos separadores en los transductores que aleja la fuente de ultrasonido de la superficie de la pieza eliminando dicha zona. (Jiménez y Bejarano, 2017: p.22)

1.2.4.3 Campo cercano o Zona de Fresnel.

Para la comprensión de los fenómenos que describiremos a continuación, imagine que el cristal piezoeléctrico que genera ondas ultrasónicas está formado por infinitos puntos oscilantes para que cada punto produzca ondas que se propagan en el medio. (Andreucci, 2006: p.14)

Al igual que una piedra que cae en un lago de aguas tranquilas producirá ondas circulares en la superficie, cada punto del cristal también se comportará de la misma manera, es decir, producirá ondas esféricas en el medio de propagación. (Andreucci, 2006: p.14)

Tenga en cuenta que en las proximidades del cristal hay una interferencia de onda muy grande entre las ondas. A medida que nos alejamos del cristal, las interferencias disminuyen y desaparecen, convirtiéndose en un solo frente de onda. La región cerca del cristal donde se manifiestan los fenómenos anteriores se llama Campo cercano con una extensión N que depende del diámetro del cristal y de la longitud de onda λ de la vibración, que puede calcularse mediante la siguiente fórmula. (Andreucci, 2006: p.14)

Para cristales circulares:
$$N = \frac{D_{ef}^2 f}{4c} \quad (14)$$

Para cristales rectangulares:
$$N = 1,3 \frac{M_{ef}^2 f}{c} \quad (15)$$

Dónde:

N Campo cercano

f Frecuencia

c Velocidad de propagación de la onda

D_{ef} Diámetro efectivo del cristal = 0,97 Diámetro real del cristal

M_{ef} Mitad de la longitud efectiva del lado más largo; Longitud efectiva = 0,97 longitud real

1.2.4.4 Campo lejano o Zona de Fraunhofer.

A partir del límite del campo cercano, el haz sónico comienza a divergir, y la variación de la presión sónica, ya no se observa. Después de una distancia equivalente a tres campos cercanos, la presión sónica en el eje acústico se reduce proporcionalmente con el inverso de la distancia, y el haz sónico diverge con un ángulo constante de divergencia. (Santin, 1997: p.56)

La región entre $1N$ y $3N$ se llama zona de transición, donde el ángulo de divergencia es variable y la disminución de la presión sonora aún no proporcional al inverso de la distancia. (Santin, 1997: p.56)

El ángulo de divergencia del haz ultrasónico puede ser calculado con las siguientes formulas.

Para cristales circulares:
$$\sin \gamma = K_1 \frac{c}{D_{eff} f} \quad (16)$$

Para cristales rectangulares:
$$\sin \gamma = K_2 \frac{c}{M_{eff} f} \quad (17)$$

Dónde:

γ Campo cercano

f Frecuencia

c Velocidad de propagación de la onda

D_{eff} Diámetro efectivo del cristal = 0,97 Diámetro real del cristal

M_{eff} Mitad de la longitud efectiva del lado más largo; Longitud efectiva = 0,97 longitud real

$K_1 = 0,51$ para divergencia en el límite de 6dB

$K_1 = 0,87$ para divergencia en el límite de 20dB

$K_1 = 1,08$ para divergencia en el límite de 30dB

$K_2 = 0,44$ para divergencia en el límite de 6dB

$K_2 = 0,74$ para divergencia en el límite de 20dB

1.3 Palpadores ultrasónicos.

Después de conocer los materiales piezoeléctricos y los efectos que intervienen en la generación de ondas ultrasónicas, corresponde enumerar y describir los elementos que conforman un palpador comúnmente empleado en el examen por ultrasonido. Aunque es frecuente el uso de transductor y palpador como sinónimo, es recomendable conocer las definiciones establecidas para estos dos términos. En el examen por ultrasonido se define como transductor a aquel elemento que tiene como función transformar energía mecánica (vibraciones) en energía eléctrica o viceversa, que es el caso de los cristales piezoeléctricos. Así mismo, se define como palpador (sonda o unidad de búsqueda) al arreglo que permite la manipulación del transductor para efectuar el examen. (Flores, 2009: p.36)

1.3.1 Clasificación de los palpadores ultrasónicos.

Al ser el transductor el elemento que convierte la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa, el palpador se convierte en pieza clave en la detección de discontinuidades por lo que es necesario conocer los tipos de palpadores ultrasónicos existentes.

En el Anexo B se muestra una forma de clasificación de los palpadores.

1.3.2 Definición de los palpadores ultrasónicos más comunes.

1.3.2.1 Palpador de incidencia normal o de haz recto.

Emite ondas longitudinales con frecuencias de 0.5 a 10 MHz. Se emplea, generalmente, para la inspección de piezas en las que se puede colocar directamente la unidad de prueba sobre el área de interés. Las discontinuidades deben estar paralelas a la superficie de contacto. También es útil en la medición de espesores. (Martínez, 2009: p.55)

1.3.2.2 Palpador de incidencia angular.

Estrictamente hablando, difieren de los transductores rectos o normales en que el cristal forma un cierto ángulo con la superficie del material. El ángulo se obtiene insertando una cuña de plástico entre el cristal piezoeléctrico y la superficie. La cuña puede ser fija, encerrada en la carcasa o intercambiable. En el último caso, tenemos un transductor normal que está sujeto con tornillos que aseguran la cuña a la carcasa. Como en la práctica normalmente operamos con diferentes ángulos (35, 45, 60, 70 y 80 grados), esta solución es más económica ya que un solo transductor con varias cuñas es de menor costo, sin embargo, necesitan más cuidado en el manejo. (Andreucci, 2006: p.22)

1.3.2.3 Palpador de contacto directo.

Se coloca directamente en la superficie de prueba aplicando presión y un medio de acoplamiento. Se fabrica para exámenes de haz recto y con haz angular. Para proteger al transductor de la abrasión se cubre con un material duro como el óxido de aluminio. (Flores, 2009: p.41)

1.3.2.4 Palpador de inmersión.

Los transductores de inmersión no entran en contacto con el componente. Estos transductores se diseñan para funcionar en un ambiente líquido y todas las conexiones son herméticas. Los transductores de inmersión tienen generalmente una capa de adaptación que los ayuda para conseguir más energía ultrasónica en el agua y, alternadamente, en el componente que es examinado. Los transductores de inmersión se pueden comprar con un lente plano, cilíndrico focalizado o esférico focalizado. Un transductor enfocado puede mejorar la sensibilidad y la resolución axial, concentrando la energía sónica a un área más pequeña. Los transductores de

inmersión se utilizan típicamente dentro de un tanque de agua o como parte de un sistema a chorro o burbujeante en aplicaciones de rastreo. (López, 2009: p.42)

1.3.2.5 Palpador de cristal único.

Este tipo de palpadores se componen de un solo cristal piezoeléctrico que realiza las funciones de emisor y receptor. Constan de las siguientes partes: un cristal piezoeléctrico, una caja o montura metálica que protege el conjunto, además del amortiguador del cristal, un hilo conductor eléctrico y una conexión. Este palpador es frecuentemente empleado en las aplicaciones generales. (Flores, 2009: p.42)

1.3.2.6 Palpador de doble cristal.

Consiste en un transductor con dos cristales separados por una barrera acústica, donde un cristal actúa como emisor de ondas longitudinales y el otro cumple la función de receptor. Dentro de sus aplicaciones, este transductor ha sido diseñado para realizar las mismas aplicaciones mencionadas para los transductores de contacto y además resaltan el monitoreo de corrosión y erosión en materiales, detección de grietas en elementos cilíndricos, inspección en campo cercano. La principal ventaja que entrega este transductor es la de eliminar el tiempo muerto entre transmisión y recepción de la señal ultrasónica, existente en transductores de contacto de cristal único que alternan su función entre emisor y receptor, debido a la existencia de dos cristales funcionando de manera simultánea, lo que se aprovecha de mejor manera en la medición de fallas o discontinuidades cercanas a la superficie de contacto. (Varas, 2013: p.10)

1.4 Métodos de inspección.

1.4.1 Método pulso-eco.

Es el método más utilizado en las inspecciones ultrasónicas, involucra la detección de ecos producidos cuando un pulso ultrasónico es reflejado por una discontinuidad o interfase en una pieza de trabajo. Este método es utilizado para detectar la localización de la discontinuidad y medir espesores. (Martínez, 2009: p.63)

La profundidad de la discontinuidad está determinada por el "tiempo de vuelo" entre el pulso inicial y el eco producido por la misma. La profundidad de la discontinuidad también se puede

determinar por el tiempo relativo de tránsito entre el eco producido por discontinuidad y eco de la superficie de respaldo. (Martínez, 2009: p.63)

Las dimensiones de las discontinuidades se estiman comparando la amplitud de la señal del sonido reflejado por una interfase con la amplitud del sonido reflejado desde un reflector de referencia de tamaño conocido o por una pieza de respaldo que no contenga discontinuidades. (Martínez, 2009: pp.63-64)

1.4.2 Método de transmisión.

Este método incluye tanto la reflexión como transmisión, involucra sólo la medición de la atenuación de señal y se utiliza para la detección de fallas. En este tipo de método, la transmisión es realizada por haz directo o reflectivo, las discontinuidades son detectadas comparando la intensidad del ultrasonido transmitido a través de la pieza contra la intensidad transmitida a través de una referencia estándar fabricada del mismo material. (Martínez, 2009: p.62)

Las pruebas de transmisión requieren de dos unidades de búsqueda, una para transmitir las ondas ultrasónicas y otra para recibirlas. Un adecuado acoplamiento es crítico para este método debido a las variaciones de sonido durante la transmisión. (Martínez, 2009: p.62)

1.4.3 Método de resonancia.

Es el método más antiguo de los ensayos no destructivos por ultrasonido, estando actualmente fuera de uso. Se utilizó principalmente para medir espesores en materiales con los dos lados uniformes y paralelos, aunque también puede ser empleado para detectar discontinuidades situadas en el mismo plano de la superficie de examen. Su fundamento se basa en la energía ultrasónica que es transmitida al material en forma continua, variando la frecuencia hasta conseguir que esta sea igual a la frecuencia de la resonancia fundamental, o a cualquiera de las armónicas del objeto que se está examinando. Lo que se mide es la frecuencia en la que se logra la resonancia del objeto, bien sea en su frecuencia fundamental o en las armónicas de resonancia, ya que existe una relación entre la longitud de onda que es reflejada dentro del objeto y el espesor del mismo. (Flores, 2009: p.82)

1.5 Soldadura.

Es una coalescencia localizada de metales o no metales producida ya sea por calentamiento de los metales a la temperatura de soldadura, con o sin la aplicación de presión, o por la aplicación de presión solamente y con o sin el uso de material de aporte. (AWS A3.0M/A3.0, p.45-46)

En los Anexos C y D se muestran los esquemas de los principales procesos de soldadura existentes.

1.5.1 Defectos en la soldadura según API 1104.

1.5.1.1 Penetración inadecuada sin desalineamiento (IP).

Se define como penetración incompleta sin desalineación al relleno incompleto de la raíz de la soldadura. Esta condición es presentada esquemáticamente en la Figura 15-1. (API 1104, p.34)

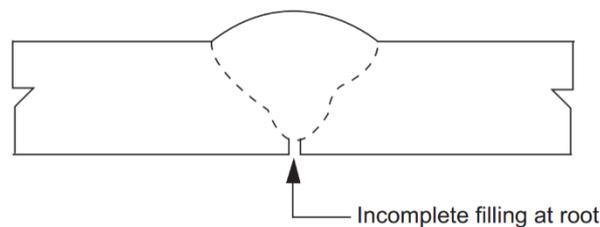


Figura 14-1: Penetración inadecuada sin desalineamiento.

Fuente: (API 1104, p.34)

Nota: Una o ambas caras de la raíz pueden estar rellenas de manera inadecuada en la superficie interior.

1.5.1.2 Penetración inadecuada debido a desalineamiento (IPD).

La penetración inadecuada debido a desalineamiento, se define como la condición que existe cuando un borde de la raíz está expuesto (o deslizado) porque la tubería adyacente o uniones de accesorios están mal alineadas. Esta condición se muestra esquemáticamente en la Figura 16-1. (API 1104, p.35)

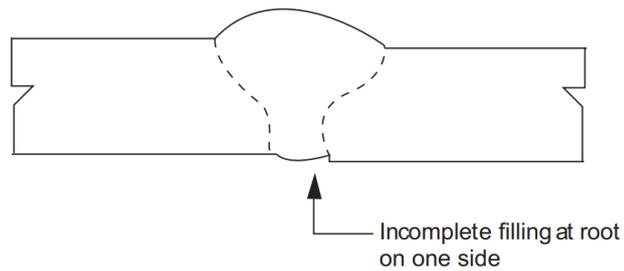


Figura 15-1: Penetración inadecuada debido a desalineamiento.

Fuente: (API 1104, p.35)

1.5.1.3 Penetración transversal inadecuada (ICP).

La penetración transversal inadecuada se define como una imperfección sub - superficial entre el primer pase interior y el primer pase exterior causada por penetrar inadecuadamente las caras verticales. Esta condición se muestra esquemáticamente en la Figura 17-1. (API 1104, p.35)

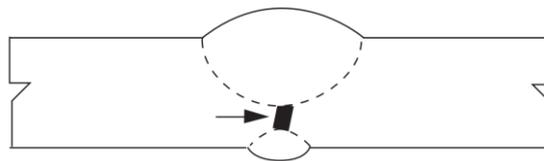


Figura 16-1: Penetración transversal inadecuada.

Fuente: (API 1104, p.35)

1.5.1.4 Fusión incompleta (IF).

La fusión incompleta se define como una imperfección superficial entre el metal de la soldadura y el metal del material base que está abierto a la superficie. Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 18-1. (API 1104, p.35)

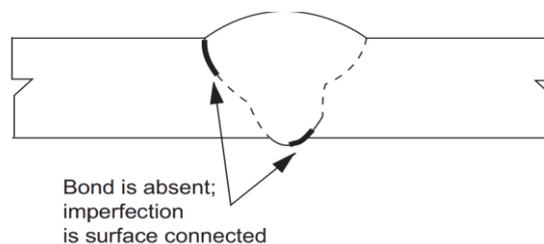


Figura 17-1: Fusión incompleta.

Fuente: (API 1104, p.36)

1.5.1.5 Fusión incompleta debido a superposición fría (IFD).

La fusión incompleta debido a superposición fría se define como una imperfección entre dos cordones adyacentes de soldadura, o entre el metal de soldadura y el metal del material base que no está abierto a la superficie. Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 19-1. (API 1104, p.36)

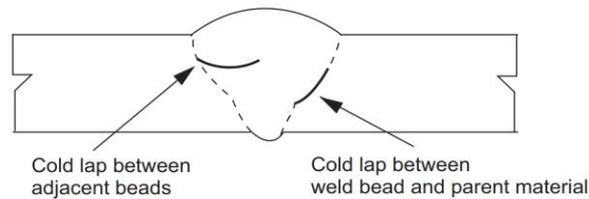


Figura 18-1: Fusión incompleta debido a superposición fría.

Fuente: (API 1104, p.36)

1.5.1.6 Concavidad interna (IC).

La concavidad interna se define como el cordón que está correctamente fusionado y penetra completamente en el espesor de la pared de la tubería a lo largo de ambos lados del bisel, pero cuyo centro está algo por debajo de la superficie interior de la pared de la tubería. La CI es mostrada esquemáticamente en la Figura 20-1. (API 1104, p.3)

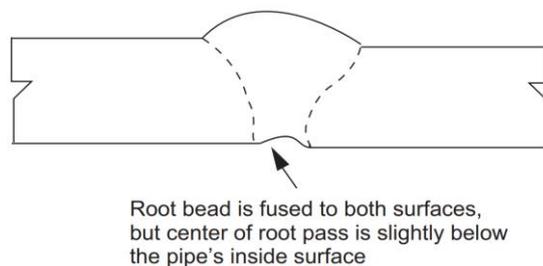


Figura 19-1: Concavidad interna.

Fuente: (API 1104, p.36)

1.5.1.7 Quemadura transversal (BT).

Una quemadura transversal es definida como una porción del cordón de raíz donde la penetración excesiva ha causado que la soldadura se haya soplado dentro de la tubería. (API 1104, p.37)

1.5.1.8 Inclusiones de escoria.

Una inclusión de escoria es un sólido no metálico atrapado en metal de soldadura o entre el metal de soldadura y el metal base. Inclusiones alargadas de escoria (ESIs) (líneas continuas ó interrumpidas de escoria, o carrileras en raíz) son encontradas generalmente en las zonas de fusión. Inclusiones aisladas de escoria (ISIs) son inclusiones irregularmente formadas y pueden ser ubicadas en cualquier lugar en la soldadura. (API 1104, p.37)

1.5.1.9 Porosidad.

La porosidad se define como un gas atrapado por la solidificación del metal de soldadura antes de que el gas tenga la oportunidad de elevarse hasta la superficie de la mezcla fundida y escapar. La porosidad es generalmente esférica, pero puede tener forma alargada o irregular, como la porosidad en tuberías. (API 1104, p.38)

Porosidad de cordón hueco (HB) se define como una porosidad lineal alargada que ocurre en el pase de raíz. (API 1104, p.40)

1.5.1.10 Socavación.

La socavación es definida como una ranura fundida dentro del material base hacía el pie o raíz de la soldadura y no estar llena del metal de soldadura, puede ser socavación adyacente al pase de acabado (EU) o pase de raíz (IU). (API 1104, p.41)

1.6 Clasificación de las indicaciones en ultrasonido.

Las indicaciones producidas por la prueba ultrasónica no son necesariamente defectos. Los cambios en la geometría de la soldadura debido al desnivel de los extremos del tubo en contacto, cambios en el perfil del refuerzo de la soldadura de raíz ID y pases de acabado OD; achaflanado interno, y conversión del modo de la onda ultrasónica debido a tales condiciones, pueden causar indicaciones geométricas similares a aquellas causados por imperfecciones de soldadura pero que no son relevantes para su aceptabilidad. (API 1104, p.43)

1.6.1 Indicaciones lineales.

Están definidas como indicaciones en su máxima dimensión en la dirección de la longitud de soldadura. Las indicaciones lineales típicas pueden ser causadas por, aunque no limitadas, los

siguientes tipos de imperfección: penetración inadecuada sin desalineamiento (IP), penetración inadecuada con desalineamiento (IPD), penetración transversal inadecuada (ICP), fusión incompleta (IF), fusión incompleta por superposición fría (IFD), inclusión de escoria alargada (ESI), fisuras (C), socavación adyacente al pase de acabado (EU) o paso de raíz (IU), y porosidad de cordón hueco (HB). (API 1104, p.43)

1.6.2 Indicaciones transversales.

Se definen como indicaciones con su mayor dimensión transversal a la soldadura. Las indicaciones transversales típicas pueden ser causadas por, aunque no limitadas, los siguientes tipos de imperfecciones: fisuras (C), inclusión de escoria alargada (ESI), fusión incompleta por superposición fría (IFD), y arranques/paradas en los pases de soldadura. (API 1104, p.43)

1.6.3 Indicaciones volumétricas.

Son definidas como indicaciones tridimensionales. Tales indicaciones pueden ser causadas por inclusiones simples o múltiples, vacíos, o poros. Los vacíos parcialmente llenados, los poros, o las inclusiones en los arranques/paradas en los pases de soldadura pueden causar indicaciones más grandes en dirección transversal que en la dirección de la longitud de la soldadura. Las indicaciones volumétricas típicas pueden ser causadas por, aunque no limitadas, los siguientes tipos de imperfecciones: concavidad interna (IC), quemadura transversal (BT), inclusiones de escoria aislada (ISIs), Porosidad (P) y porosidad agrupada (CP). (API 1104, p.43)

1.7 Estándares de aceptación en ultrasonido.

1.7.1 General.

Las indicaciones se considerarán defectos si se presenta alguna de las siguientes condiciones (API 1104, p.44):

- a) indicaciones determinadas como grietas,
- b) indicaciones individuales con una dimensión de altura vertical (a través de la pared) que se determina que es mayor que un cuarto de el espesor de la pared,
- c) múltiples indicaciones en la misma ubicación circunferencial con una dimensión de altura vertical sumada (a través de la pared) excediendo un cuarto del espesor de la pared.

1.7.2 Indicaciones de superficie lineal (LS).

Las indicaciones LS (distintas de las grietas) que se interpreten como abiertas a la superficie del DI o del DE se considerarán defectos si se presenta alguna de las siguientes condiciones (API 1104, p.44):

- a) la longitud total de las indicaciones de LS en cualquier longitud continua de 12 pulg. (300 mm) de soldadura excede 1 pulg. (25 mm),
- b) la longitud total de las indicaciones LS excede el 8% de la longitud de la soldadura.

1.7.3 Indicaciones de lineal enterrado (LB).

Las indicaciones de LB (distintas de las grietas) que se interpretan como subsuperficiales dentro de la soldadura y no conectadas a la superficie de DI u OD se considerarán defectos si se presenta alguna de las siguientes condiciones (API 1104, p.44):

- a) la longitud total de las indicaciones de LB en cualquier longitud continua de 12 pulgadas (300 mm) de soldadura excede las 2 pulgadas (50 mm),
- b) la longitud total de las indicaciones LB excede el 8% de la longitud de la soldadura.

1.7.4 Indicaciones de línea transversal (T).

Las indicaciones T (distintas de las grietas) se considerarán volumétricas y se evaluarán utilizando los criterios para las indicaciones volumétricas. La letra T se utilizará para designar todas las indicaciones transversales notificadas. (API 1104, p.44)

1.7.5 Indicaciones de volumétrico en grupo (VC).

Las indicaciones de VC se considerarán defectos cuando la dimensión máxima de las indicaciones de VC exceda 1/2 pulg. (13 mm). (API 1104, p.44)

1.7.6 Indicaciones de volumétrico individual (VI).

Las indicaciones VI se considerarán defectos cuando la dimensión máxima de las indicaciones VI exceda 1/8 de pulgada (3 mm). (API 1104, p.44)

1.7.7 Indicaciones de raíz volumétrica (VR).

Las indicaciones de VR que se interpreten como abiertas a la superficie de ID se considerarán defectos si se presenta alguna de las siguientes condiciones (API 1104, p.44):

- a) la dimensión máxima de las indicaciones de VR excede 6 mm (1/4 de pulgada) o el espesor de pared especificado, el que sea menor;
- b) la longitud total de las indicaciones VR excede 1/2 pulg. (13 mm) en cualquier longitud continua de 12 pulg. (300 mm).

1.7.8 Acumulación.

Cualquier acumulación de indicaciones relevantes se considerará un defecto cuando exista alguna de las siguientes condiciones (API 1104, p.45):

- a) la longitud total de las indicaciones por encima del nivel de evaluación excede 2 pulgadas (50 mm) en cualquier longitud de 12 pulgadas (300 mm) de soldadura,
- b) la longitud total de las indicaciones por encima del nivel de evaluación excede el 8% de la longitud de la soldadura.

1.7.9 Imperfecciones de material base.

Las imperfecciones en el material base detectadas por pruebas ultrasónicas deberán ser informadas a la empresa. La disposición de estas imperfecciones será la que indique la empresa. (API 1104, p.45)

CAPÍTULO II

2 MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se detallan los materiales que se utilizarán en la elaboración de las probetas de soldadura con discontinuidades inducidas, los equipos que se emplearan en la inspección, así como también la metodología del proceso de soldadura, (que parte bajo procedimientos previamente calificados) desde la selección del material base, su preparación, el proceso de unión; de igual manera se mencionará del proceso de inducción de discontinuidades controladas en la soldadura y de las técnicas de ultrasonido a realizar, cada una con su respectiva configuración.

2.1 Materiales para la elaboración de las probetas.

2.1.1 *Material Base.*

El material de la tubería, al igual que sus dimensiones deben estar en concordancia con el WPS (Especificación de procedimiento de soldadura – Anexo E), el PQR (Registro de calificación de procedimiento de soldadura – Anexo F) y los WPQ (Registro de calificación de soldador – Anexos G y H), documentos que fueron realizados bajo la norma API 1104, misma que establece en el punto 5.3.2.2. los materiales para tubería a los citados en el código API 5L, que dice textualmente lo siguiente:

Los grados cubiertos por ésta especificación son los grados estándar A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70 y X80; y cualquier grado intermedio (grados superiores a X42, intermedios a dos grados estándar secuenciales y acordados por el comprador y el fabricante).

La tubería PSL 1 se puede suministrar en los grados A25 a X70.

Como se puede observar, el requerimiento según el WPS especifica tuberías de acero con límite de fluencia mayor que 290MPa [42000Psi] y menor o igual que 415MPa [60000Psi]. Se selecciona un acero API 5L X60 y como se puede apreciar en la tabla 1-2, este acero tiene un S_y de 60000Psi por lo que cumple con el requisito del WPS.

La tabla 2-2 muestra la composición química de este acero.

Tabla 1-2: Tensile Requirements for PSL 1.

(1) Grade	(2)		(3)		(4) Elongation in 2 in (50,8 mm). Minimum, Percent
	Yield Strength, Minimum		Ultimate Tensile Strength. Minimum		
	psi	MPa	Psi	MPa	
A25	25000	172	45000	310	a
A	30000	207	48000	331	a
B	35000	241	60000	414	a
X42	42000	290	60000	414	a
X46	46000	317	63000	434	a
X52	52000	359	66000	455	a
X56	56000	386	71000	490	a
X60	60000	414	75000	517	a
X65	65000	448	77000	531	a
X70	70000	483	82000	565	a

Fuente: (API 5L: p.37).

Tabla 2-2: PSL 1 Chemical Requirements for Heat and Product Analyses by Percentage of Weight.

(1) Grade & Class	(2) Carbon, Maximum ^a	(3) Manganese, Maximum ^a	(4) Phosphorus		(5) Sulfur, Maximum	(6) Titanium, Maximum	(7) Other
			Minimum	Maximum			
			Seamless				
A25, C1 I	0,21	0,60		0,030	0,030		
A25, C1 II	0,21	0,60	0,045	0,080	0,030		
A	0,22	0,90		0,030	0,030		
B	0,28	1,20		0,030	0,030	0,04	b, c, d
X42	0,28	1,30		0,030	0,030	0,04	c,d
X46, X52, X56	0,28	1,40		0,030	0,030	0,04	c,d
X60 ^f	0,28	1,40		0,030	0,030	0,04	c,d
X65 ^f , X70 ^f	0,28	1,40		0,030	0,030	0,06	c,d
Welded							
A25, C1 I	0,21	0,60		0,030	0,030		
A25, C1 II	0,21	0,60	0,045	0,080	0,030		
A	0,22	0,90		0,030	0,030		
B	0,26	1,20		0,030	0,030	0,04	b, c, d
X42	0,26	1,30		0,030	0,030	0,04	c,d
X46, X52, X56	0,26	1,40		0,030	0,030	0,04	c,d
X60 ^f	0,26	1,40		0,030	0,030	0,04	c,d
X65 ^f	0,26	1,45		0,030	0,030	0,06	c,d
X70 ^f	0,26	1,65		0,030	0,030	0,06	c,d

Fuente: (API 5L: p.36).

2.1.1.1 Diámetro nominal.

Para poder determinar la capacidad de detección de las técnicas ultrasónicas, se debe tener una cantidad considerable de discontinuidades, para lo cual, se opta por un diámetro de 10in. Ésta dimensión otorgara una longitud del cordón de soldadura de 856mm. También se debe tener en cuenta que el diámetro seleccionado no puede estar fuera del rango permitido en el WPS que especifica diámetros exteriores mayores a 60.3mm [2.375in] y de los WPQ que están calificados para un rango de diámetro exterior de 60.3mm [2.375in] hasta 323.9mm [12.75in].

2.1.1.2 Espesor de pared.

El espesor de pared debe ser tal, que permita inducir las distintas discontinuidades a diferentes niveles de profundidad, por éste motivo se utilizará un espesor no menor a 10mm para poder realizar varios pases de soldadura. Éste, al igual que el diámetro nominal debe cumplir con los requerimientos del WPS y de los WPQ, que especifican rangos de espesores desde 4.8mm [0.188in] hasta 19.1mm [0.750in] y desde 4.8mm [0.188in] hasta 19.1mm [0.750in] respectivamente, es así que se selecciona un espesor de pared de 15.09mm [0.594in], correspondiente a una tubería cédula 80 que es uno de los tamaños más comunes empleados por diferentes industrias y sus propiedades se pueden apreciar en el Anexo I.

2.1.2 Material de aporte.

Tal y como especifica el WPS, los electrodos a utilizar son el ER70S-6 en los pases de raíz y el E8010-G en los pases de relleno.

El ER70S-6 es un alambre sólido de acero al carbono (acero dulce) con recubrimiento de cobre, formulado con un alto contenido de Silicio y Manganeso que mitigan las porosidades en la soldadura gracias a sus propiedades desoxidantes. Su gas de protección es el CO₂ o con una mezcla de argón. En la tabla 3-2 se puede apreciar su composición química.

El E8010-G es un electrodo de baja aleación, celulósico, especialmente diseñado para la soldadura de tuberías en la industria petrolera de los tipos API 5L Gr. X56, X60 y X65 y aceros en general que tengan resistencia a la tracción de hasta 80ksi. Se puede utilizar en cualquier posición de soldadura, este producto esta designado como E8010-G, sin embargo, cumple los requisitos de E8010-P1. En tabla 5-2 se puede apreciar un fragmento de la tabla general emitida por la norma AWS A5.5/A5.5M de su composición química.

Tabla 3-2: Chemical Composition Requirements for Solid Electrodes and Rods.

AWS Classification ^b		UNS ^c Number	Weight Percent ^a												
A5.18	A5.18M		C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu ^d	Ti	Zr	Al
ER70S-2	ER48S-2	K10726	0,07	0,09 to 1,40	0,40 to 0,70	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	0,05 to 0,15	0,02 to 0,12	0,05 to 0,15
ER70S-3	ER48S-3	K11022	0,06 to 0,15	0,09 to 1,40	0,45 to 0,75	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	---	---	---
ER70S-4	ER48S-4	K11132	0,06 to 0,15	1,00 to 1,540	0,65 to 0,85	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	---	---	---
ER70S-6	ER48S-6	K11140	0,06 to 0,15	1,40 to 1,85	0,80 to 1,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	---	---	---
ER70S-7	ER48S-7	K11125	0,07 to 0,15	1,50 to 2,00 ^e	0,50 to 0,80	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5	---	---	---
ER70S-G	ER48S-G	-----	-----Not Specified ^f -----												

Fuente: (AWS A5.18/A5.18M: p.2).

Tabla 4-2: Chemical Composition Requirements for Undiluted Weld Metal.

AWS Classification ^c		UNS Number ^d	Weight Percent ^{a,b}								Additional Elements ^{e,f}	
A5.5	A5.5M		C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Type	Amt
Pipeline Steel Electrodes												
E7010-P1	E4910-P1	W17110	0,20	1,20	0,60	0,03	0,03	1,00	0,30	0,50	V	0,10
E8010-P1	E5510-P1	W18110	0,20	1,20	0,60	0,03	0,03	1,00	0,30	0,50	V	0,10
E9010-P1	E6210-P1	W19110	0,20	1,20	0,60	0,03	0,03	1,00	0,30	0,50	V	0,10
E8018-P2	E5518-P2	W18218	0,12	0,90-1,70	0,80	0,03	0,03	1,00	0,20	0,50	V	0,05
E9018-P2	E6218-P2	W19218	0,12	0,90-1,70	0,80	0,03	0,03	1,00	0,20	0,50	V	0,05
E8045-P2	E5545-P2	W18245	0,12	0,90-1,70	0,80	0,03	0,03	1,00	0,20	0,50	V	0,05
E9045-P2	E6245-P2	W19245	0,12	0,90-1,70	0,80	0,03	0,03	1,00	0,20	0,50	V	0,05
E10045-P2	E6945-P2	W10245	0,12	0,90-1,70	0,80	0,03	0,03	1,00	0,20	0,50	V	0,05

Fuente: (AWS A5.5/A5.5M: p.11).

2.2 Equipos y accesorios ultrasónicos.

El equipamiento adecuado influirá en la calidad de resultados que se estima obtener, es por ello que el equipo, los accesorios y los bloques de referencia son de gran importancia; la correcta selección de los transductores intervendrá en el tamaño mínimo de discontinuidades a ser detectadas por el examen ultrasónico, en el código ASME sección V se obtiene recomendaciones de las características que deben cumplir tanto el equipo como los transductores a utilizar en la inspección, basándose en el espesor de pared de la tubería, el diámetro de la tubería, etc. También menciona que el equipo a utilizar debe cumplir con los requerimientos mínimos establecidos en la normativa y debe contar con el certificado de

calibración vigente. Los bloques para calibración deben ser efectuados acorde los requerimientos de la norma API 1104.

2.2.1 Equipo de ultrasonido industrial.

El equipo que se utilizará para el estudio de este proyecto pertenece a la marca SONATEST modelo VEO 16:64. Éste equipo presta todas las facilidades para poder realizar las distintas inspecciones con las diferentes técnicas de ultrasonido industrial (pulso-eco convencional, arreglo de fases y TOFD), cuenta con la debida calibración certificada emitida por la empresa fabricante tal y como se puede observar en el Anexo J. En la Figura 1-2 se muestra una imagen del equipo.



Figura 1-2: Equipo de ultrasonido SONATEST VEO 16:64.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.2.2 Accesorios.

El kit de accesorios que se utiliza en la inspección ultrasónica generalmente consta de 3 elementos que son:

Cable de conexión: es el encargado de llevar el estímulo eléctrico entre el equipo y el transductor.

Transductor: genera las ondas ultrasónicas que viajan en el material a inspeccionar.

Zapatillas: también llamadas cuñas, ayudan al transductor a direccionar el haz ultrasónico a diferentes ángulos y a producir las ondas transversales o de corte que se utilizan para inspeccionar la soldadura.

A la unión de estos 3 elementos conjunto con el equipo ultrasónico se lo denomina unidad de búsqueda.

2.2.2.1 Accesorios para inspección por ultrasonido pulso-eco convencional.

En la Figura 2-2 se muestra los accesorios para la inspección ultrasónica pulso-eco convencional, el cual consta de:

- (1) Cable de conexión lemo 00.
- (2) Transductor de haz angular marca HIGH TECH de diámetro de $\frac{1}{4}$ in y frecuencia de 5MHz.
- (3) 3 zapatas o cuñas de la marca HIGH TECH a 45°, 60° y 70°.
- (4) Bloque de referencia – sirve para evaluar el punto de salida del haz ultrasónico en la unidad de búsqueda y configurar la velocidad del haz ultrasónico en el acero.

La frecuencia y el tamaño del transductor cumplen con los requerimientos expuestos en el código ASME sección V en el párrafo T-432, del mismo modo, las zapatas cumplen con el ítem T-432.2.



Figura 2-2: Kit ultrasónico pulso-eco convencional.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.2.2.2 Accesorios para inspección por ultrasonido arreglo de fases manual.

Para efectuar el ensayo de ultrasonido por arreglo de fases manual, se necesita de los siguientes accesorios:

- (1) Cable conector DAAH 1.
- (2) Transductor PA modelo D1A-5.0M32E0.8P de la marca SONATEST, consta de 32 elementos con un espaciado entre cristales de 0.8mm y frecuencia de 5MHz.

(3) 1 zapata o cuña T1-37W10inD de rexolita (2.33 mm/μs), tipo AOC de la marca SONATEST.



Figura 3-2: Kit ultrasónico arreglo de fases manual.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

La frecuencia y el tamaño del transductor cumplen con los requerimientos expuestos en el código ASME sección V en el párrafo T-432 y las zapatas cumplen con el ítem T-432.2.

2.2.2.3 Accesorios para inspección por ultrasonido arreglo de fases semiautomático.

A más de los elementos que se utilizan en la inspección por arreglo de fases manual se necesita de los siguientes elementos que se detallan a continuación y se los observa en la Figura 4-2:

(1,2,3) Unidad de búsqueda (inspección arreglo de fases manual).

(4) 1 encoder o codificador de tipo cuadratura del fabricante SCANCON – su función es registrar la inspección por ultrasonido mediante el giro del mismo, el cual es convertido a un desplazamiento lineal, que corresponde a la longitud de soldadura inspeccionada.

(5) 1 escáner magman III de la marca PHOENIX – sirve de soporte a los transductores y codificador, la mayoría tienen ruedas magnéticas que se adhieren al material a inspeccionar.



Figura 4-2: Kit ultrasónico arreglo de fases semiautomático.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

La frecuencia y el tamaño del transductor cumplen con los requerimientos expuestos en el código ASME sección V en el párrafo T-432 y las zapatas cumplen con el ítem T-432.2.

2.2.2.4 Accesorios para inspección por ultrasonido TOFD.

La técnica de TOFD requiere de un sistema de adquisición de datos y también de dos transductores uno emisor y otro receptor, estos elementos se pueden apreciar en la Figura 5-2.

- (1) 2 cables de conexión lemo 00.
- (2) 2 transductores para TOFD PHOENIX modelo DTOF 05/02 con frecuencia de 5MHz.
- (3) 2 zapatas PHOENIX modelo WTOFI 12/70, con un ángulo de refracción de 70°.
- (4) 1 encoder o codificador de tipo cuadratura del fabricante SCANCON
- (5) 1 escáner magman III de la marca PHOENIX.



Figura 5-2: Kit ultrasónico TOFD.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

La frecuencia y el tamaño de los transductores para TOFD cumplen con los requerimientos expuestos en el código ASME sección V en el párrafo III-432, se toma como referencia el apéndice no mandatorio O del artículo 4 del código ASME sección V para la configuración general de TOFD.

En la Tabla 5-2 se detalla los parámetros de la unidad de búsqueda mediante TOFD para espesores base menores a 3in [75mm], en este caso el espesor base es de 0.594in [15.09mm] se encuentra dentro de la segunda condición de la tabla y se recomienda que la frecuencia del transductor sea entre 5 y 10 MHz, el tamaño del elemento de 0.125 a 0.25 in [3 a 6 mm] y el ángulo de la zapata de 50° a 70°.

Tabla 5-2: Search units parameters for single zone examinations up to 3 in. (75mm).

Thickness, t, in. (mm)	Nominal Frequency, Mhz	Element Size, in. (mm)	Angle, deg
< 0.5 (< 13)	10 to 15	0.125 to 0.25 (3 to 6)	60 to 70
0.5 to < 1.5 (13 to < 38)	5 to 10	0.125 to 0.25 (3 to 6)	50 to 70
1.5 to < 3 (38 to < 75)	2 to 5	0.25 to 0.5 (6 to 13)	45 to 65

Fuente: (ASME section V: p.115).

Las zonas de inspección se recomiendan en la tabla 6-2 y van a depender del espesor del material base, bajo las condiciones de este estudio se requiere inspeccionar con TOFD en una zona (esto quiere decir que con un par de transductores se puede efectuar toda la inspección de la junta en un solo escaneo) utilizando una intercepción del haz en 2/3 del espesor del material base.

Tabla 6-2: Recommended TOFD zones for butt welds up to 12 in. (300mm).

Thickness, t, in. (mm)	Number of Zones, [Note (1)]	Depth Range	Beam Intersection (approx.)
< 2 (< 50)	1	0 to t	2/3 t
2 to < 4 (50 to < 100)	2	0 to t/2 t/2 to t	2/3 t 5/6 t
4 to < 8 (100 to < 200)	3	0 to t/3 t/3 to 2t/3 2t/3 to t	2t/9 5t/9 8t/9
8 to < 12 (200 to < 300)	4	0 to t/4 t/4 to t/2 t/2 to 3t/4 3t/4 to t	t/12 5t/12 8t/12 11t/12

NOTE: (1) Multiple zones do not have to be of equal height

Fuente: (ASME section V: p.115).

2.2.3 Bloques de referencia.

2.2.3.1 Bloque de referencia IIW tipo 1.

El bloque de referencia IIW tipo 1 es un bloque estándar que ayuda al examinador ajustar el punto de salida del haz ultrasónico o index point (éste debe coincidir con el que se encuentre marcado en la zapata), también permite verificar el ángulo refractado en el acero y configurar la velocidad de propagación del ultrasonido en el metal.



Figura 6-2: Bloque de referencia IIW tipo 1

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.2.3.2 Bloque de referencia PA test block.

El PA test block es un bloque estándar que permite realizar configuraciones de velocidad de propagación del sonido en el acero y retardo de zapata en el ultrasonido arreglo de fases.



Figura 7-2: PA test block

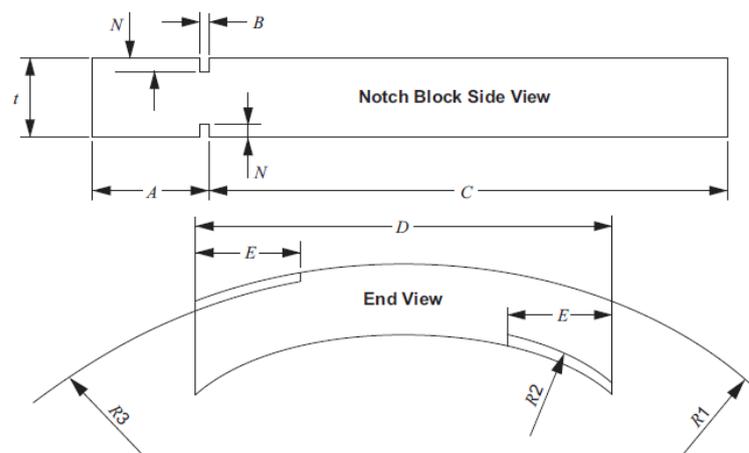
Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.2.3.3 Bloque de referencia según API 1104.

Para configurar la altura de la pantalla y realizar la curva DAC (corrección de la amplitud en función de la distancia) o TCG (corrección de la ganancia en función del tiempo), se debe regir al código aplicable a la soldadura que en este caso de estudio es el API 1104, el cual establece la

construcción de bloques de calibración con dos notch, un interno y el otro externo, éste bloque de calibración debe ser elaborado de un tramo de la misma tubería que va a servir de material base. Las dimensiones según API 1104 para realizar este bloque se observan en la Figura 8-2.

Al tener en cuenta que, estos notch van a ser quienes establezcan el nivel de referencia a la cual, se debe ajustar la sensibilidad con la que se realizará la configuración del equipo, la elaboración de los notch se lo debe realizar con la mayor precisión posible, en especial las aristas vivas que funcionan como trampa para que el haz ultrasónico mediante difracción del mismo retorne al transductor, por ello, la mejor técnica para realizar estos notch es electro erosión, para así tener una buena precisión en las aristas y pueda ser usado como bloque de referencia para la calibración de los equipos. Adicionalmente, el tramo de tubería destinado para bloque de calibración debe ser inspeccionado con haz recto en toda su superficie, para asegurar que no exista defectos de fabricación como laminaciones, que pueden inferir en el proceso de calibración del equipo. En la Figura 9-2, se muestra el bloque de calibración utilizado en este estudio.



Dimensions

t	Specified pipe wall thickness
N	Notch depth = $10\%T \pm 10\%$ of notch depth
A	2 in. (50 mm) minimum length
B	0.125 in. (3.2 mm) maximum notch width
C	$11.35T + 2$ in. (50 mm) minimum length
D	3.1 in. (80 mm) minimum width
E	1 in. (25 mm) minimum notch length
$R1$	Outside radius of pipe
$R2$	Radius of inside notch = $R1 - 0.9T$

Figura 8-2: Dimensiones del bloque de calibración según API 1104.

Fuente: (API 1104: p.64).



Figura 9-2: Bloque de calibración.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.3 Elaboración de las probetas de soldadura.

Para la elaboración de las probetas de soldadura, se parte de procedimientos calificados mediante la norma API 1104, que utiliza un proceso mixto de soldadura GTAW-SMAW especificado en el Anexo E.

Se realizará un total de 6 juntas cuyo proceso de elaboración se detalla a continuación.

2.3.1 Selección del material.

El material seleccionado para este caso de estudio es una tubería API 5L X60 cédula 80 con diámetro nominal de 10in y espesor de pared de 15.09mm, se corroboró las especificaciones técnicas de la tubería con la ayuda de un flexómetro para el diámetro y el espesor mediante la técnica de ultrasonido aplicado a medición de espesores como se puede ver en la Figura 10-2.



Figura 10-2: Verificación del espesor mediante UT.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.3.2 Corte de los carretos.

Una vez seleccionada la tubería, se procede a cortar los carretos con la ayuda de una biseladora que trabaja mediante oxicorte (Figura 11-2). Debido a que las juntas a realizar no son para calificación del desempeño soldador o del procedimiento de soldadura, la longitud de cada carrito no se encuentra estipulado en ningún código o norma, sin embargo, ésta longitud fue determina de tal manera que permita examinar el 100% de la soldadura mediante las distintas técnicas de ultrasonido sin inconveniente alguno estimando una longitud de 15 cm para cada carrito. Las dimensiones totales de los carretos se pueden observar en la Figura 12-2.



Figura 11-2: Corte de los carretos.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

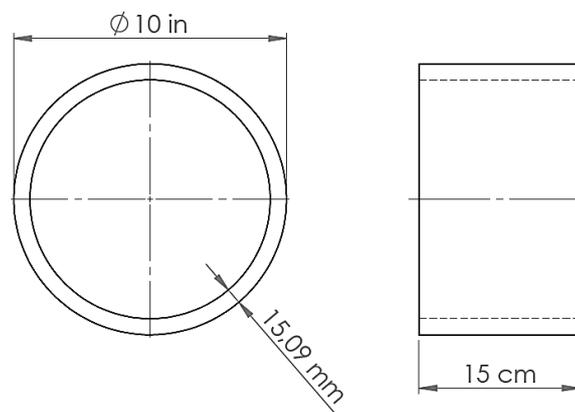


Figura 12-2: Dimensiones del carrito.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.3.3 Preparación del biselado.

El biselado de los carretos se lo realiza mediante las especificaciones dadas en el WPS, cuyas dimensiones de ángulo de bisel y altura de raíz son de 30° y 2mm respectivamente.

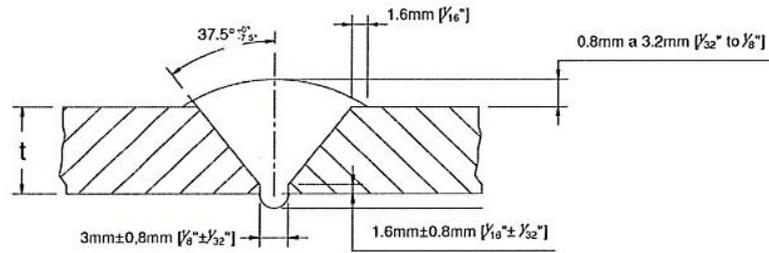


Figura 13-2: Dimensiones del bisel.

Realizado por: Pil, 2015.



Figura 14-2: Biselado de juntas en V.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.3.4 Armado de la junta.

En la Figura 15-2, se puede observar el armado de la junta, misma que está acorde a lo establecido en el WPS y cuyos valores para todas las probetas a efectuarse son los siguientes:

Apertura de raíz: 3.5 mm

Ángulo de ranura: 60°

Desalineamiento máximo: 3mm

El código API 1104 para procesos de calificación de soldadores, establece posiciones en las que se debe realizar dicha soldadura, en este caso se ha tomado la posición 6G para efectuar la soldadura de los carretos, teniendo a consideración que en ésta posición se realizó la calificación de los soldadores y que la superficie del bisel queda en una posición que permite al soldador maniobrar de mejor manera para poder inducir las discontinuidades tipo falta de fusión en el bisel.



Figura 15-2: Armado de la junta.

Realizado por: Trujillo, Manuel, 2021.

2.3.5 *Proceso de soldadura de la probeta.*

Una vez armada la junta, se da inicio al proceso de soldadura (Figura 16-2) mediante las especificaciones dadas en el WPS, que establece un proceso de soldadura manual mixto GTAW-SMAW, en donde el pase de raíz se lo realizará en caliente con el proceso GTAW en dirección ascendente con polaridad negativa, y los pases de relleno se realizará mediante el proceso SMAW en dirección descendente con polaridad positiva. Entre el pase de raíz y el inicio del segundo pase debe haber un tiempo menor o igual a 30 minutos, mientras que entre el segundo pase hasta completar la soldadura el tiempo no debe exceder las 24 horas.



Figura 16-2: Ejecución del proceso de soldadura.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

No hay necesidad de precalentamiento y se utilizará Argón como gas de protección para el proceso GTAW con un caudal de entre [9 - 20] lpm, boquilla #6 o #8.

En la tabla 7-2, se puede apreciar las características principales de la especificación del procedimiento de soldadura que se aplicará en las probetas.

Tabla 7-2: Especificaciones del procedimiento de soldadura.

Pase	Proceso	Material de aporte			Progresión	Amperaje (A)	Voltaje (V)	Gasto (lpm)	Velocidad de avance (cm/min)
1	GTAW	ER70S-6	DC(-)	1/16"	Ascendente	120	15	10	10
2	GTAW	ER70S-6	DC(-)	3/32"	Ascendente	200	17	15	12
3	SMAW	E8010G	DC(+)	3/16"	Descendente	150	26	N/A	15
4	SMAW	E8010G	DC(+)	3/16"	Descendente	140	28	N/A	18
5	SMAW	E8010G	DC(+)	3/16"	Descendente	140	28	N/A	18

Realizado por: Pil, 2015.

Los electrodos a utilizar en este proceso se los especifica en la Tabla 8-2, también se detalla el diámetro para cada pase de soldadura.

Tabla 8-2: Electrodo usados en cada pase de soldadura.

Pase	Material de Aporte	Diámetro (in)
1	ER70S-6	1/16"
2	ER70S-6	3/32"
3	E8010G	3/16"
4	E8010G	3/16"
5	E8010G	3/16"

Realizado por: Pil, 2015.

Los soldadores a realizar el trabajo son calificados con estampa API (ver Anexos G y H).

2.3.6 Inducción de las discontinuidades.

Los soldadores encargados de realizar éste proceso, deben garantizar que la soldadura tenga las distintas discontinuidades para los fines de estudio, cabe recalcar que para inducir estas discontinuidades se alterará los parámetros de los procesos de soldadura, las discontinuidades que van a ser inducidas, están entre las más comunes citadas en el código API 1104 y su proceso de inducción se detalla a continuación.

2.3.6.1 Fisuras.

La aparición de una fisura o grieta es la consecuencia de haber realizado un enfriamiento inadecuado o por una concentración de tensiones en la junta, una vez establecido el armado de la junta, se realizó un punto de soldadura de 25mm de longitud en el pase de raíz, a éste se le realiza unas entallas (pequeños cortes) en los extremos usando una amoladora y un disco de

corte, se procede a generar un esfuerzo mediante martilleo en el punto de soldadura con el fin de producir la separación de la junta y en consecuencia el agrietamiento en la soldadura, se realiza nuevamente el armado de la junta tratando de unir lo más preciso posible, el posterior pase (2 pase) de soldadura aplicada en esta sección se lo realiza con una menor intensidad (120A/15V) para que la fisura no se vuelva a fusionar.



Figura 17-2: Fisura.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.3.6.2 *Penetración incompleta.*

Para el proceso de soldadura y el tipo de unión seleccionados, una penetración incompleta se la obtiene mediante el uso de un electrodo de mayor diámetro al establecido en el WPS, también se puede ayudar disminuyendo el valor de la apertura de raíz y empleando una intensidad de corriente menor a la que se debería realizar el proceso de soldadura establecido en la tabla 7-2.



Figura 18-2: Penetración incompleta.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.3.6.3 *Falta de fusión.*

Ésta discontinuidad se logra disminuyendo la intensidad de corriente y realizando una velocidad de avance mayor a los parámetros establecidos en la tabla 7-2, también se debe aumentar la longitud del arco.



Figura 19-2: Falta de fusión.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.3.6.4 *Inclusiones de escoria.*

La inclusión de escoria para este caso aplica únicamente al proceso de soldadura SMAW y se obtiene al no realizar la limpieza de la escoria al finalizar el tercer pase de soldadura; el siguiente pase (posterior al área en donde se desea tener la discontinuidad), debe ser aplicado con una intensidad de corriente ligeramente menor al estipulado en el WPS.



Figura 20-2: Inclusión de escoria.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.3.6.5 *Porosidad aislada y agrupada.*

Para lograr el efecto se utiliza un electrodo E7018, que será humedecido antes de iniciar el proceso de soldadura, se puede también aumentar la intensidad de corriente con respecto a la establecida en el WPS.



Figura 21-2: Porosidad a) aislada b) agrupada.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.3.6.6 *Socavación externa e interna.*

Se utiliza un electrodo de un diámetro mayor al estipulado en el WPS y una intensidad de corriente superior.



Figura 22-2: Socavación a) externa b) interna.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.3.6.7 *Concavidad interna.*

Luego de realizar el pase de raíz y en caliente se procede a eliminar la soldadura de un tramo específico y a rellenar nuevamente con el material de aporte mediante soldadura, este proceso se repite hasta que en la soldadura se evidencia una concavidad interna debido a los calentamientos frecuentes producidos por el proceso de soldadura.



Figura 23-2: Concavidad interna.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.3.7 Resumen de las discontinuidades inducidas que se prevé obtener.

Se elaboró 6 probetas de soldadura, tratando de establecer la mayor cantidad de discontinuidades que pueda contener en cada junta.

En la Tabla 9-2, se detalla la ubicación en donde se prevé dejar las discontinuidades del proceso de soldadura a lo largo de su perímetro, tomando como referencia de origen la parte superior de la tubería, lugar en el que se producirá el empate de los cordones y un sentido de avance (este deberá ser el mismo sentido de avance de la inspección realizada posteriormente). Ésta tabla servirá como guía para la verificación de las discontinuidades presentes en la soldadura mediante la ruptura de la misma, de ahí la importancia de que el soldador tenga la suficiente destreza para no dejar otras discontinuidades a parte de las previamente establecidas.

Tabla 9-2: Detalle de la ubicación de las discontinuidades que se prevé inducir.

Probeta N°	Discontinuidad	Ubicación (mm)	
		Desde	Hasta
Junta 1	Falta de fusión	0	25
	Falta de fusión	75	125
	Escoria alargada	150	181
	Concavidad interna	180	190
	Penetración incompleta	380	400
	Porosidades	700	800
	Escoria alargada	800	825
	Falta de fusión	840	856

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Tabla 9-2: Detalle de la ubicación de las discontinuidades que se prevé inducir (continuación).

Probeta N°	Discontinuidad	Ubicación (mm)	
		Desde	Hasta
Junta 2	Falta de fusión	10	50
	Escoria alargada	80	130
	Porosidades	150	190
	Porosidades	250	310
	Penetración incompleta	310	340
	Fisura	350	400
	Falta de fusión	575	625
	Falta de fusión	650	725
	Escoria alargada	805	815
Junta 3	Penetración incompleta	15	25
	Porosidad agrupada	115	125
	Falta de fusión	150	175
	Falta de fusión	240	265
	Socavación interna	330	350
	Penetración incompleta	400	425
	Falta de fusión	620	660
	Escoria	803	808
Junta 4	Porosidades	50	125
	Escoria alargada	125	170
	Penetración incompleta	618	671
	Falta de fusión	675	700
	Penetración incompleta	810	856
Junta 5	Falta de fusión	0	20
	Penetración incompleta	15	50
	Concavidad externa	65	75
	Porosidades	75	125
	Falta de fusión	125	200
	Penetración incompleta	250	325
	Escoria	785	805
	Porosidades	800	856

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Tabla 9-2: Detalle de la ubicación de las discontinuidades que se prevé inducir (continuación).

Probeta N°	Discontinuidad	Ubicación (mm)	
		Desde	Hasta
Junta 6	Penetración incompleta	15	75
	Falta de fusión	75	100
	Socavación externa	80	90
	Falta de fusión	120	170
	Nido de poros	175	185
	Falta de fusión	297	324
	Escoria	565	580
	Porosidades	600	625
	Escoria	675	735
	Escoria	750	760
	Falta de fusión	775	825
	Penetración incompleta	825	850

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.4 Calibración de los equipos de ultrasonido.

Un examen ultrasónico bien ejecutado, va a depender de una buena configuración del equipo, ésta configuración debe estar realizada acorde a la normativa de referencia aplicable. Para asegurar una correcta calibración de los equipos ultrasónicos, se lo realiza bajo la supervisión de un inspector ASNT NIVEL II (Anexos L, M) en las técnicas de ultrasonido a efectuar el estudio.

2.4.1 Calibración de los equipos para ultrasonido pulso-eco convencional.

Se inicia con la selección del grado de refracción del haz ultrasónico, esto se lo realiza mediante el uso de zapatas que generalmente son de 45, 60 y 70 grados; debido a que el ángulo de preparación del bisel es de 30° se opta por realizar la inspección con una zapata de 60°, con ello se obtendrá un ángulo recto entre el haz ultrasónico incidente en segunda pierna y el bisel de la ranura. Bajo esta condición se espera que la onda de ultrasonido se refleje con mayor intensidad ante la presencia de alguna discontinuidad presente en el bisel de la junta soldada.

Los notch en el bloque de calibración de tuberías se utilizan para configurar el rango de distancia que se muestra en la pantalla del equipo. Tienen la ventaja de proporcionar reflectores a distancias precisas a las superficies interiores y exteriores.

Se debe verificar el punto de salida del haz ultrasónico para lo cual se usa el bloque IIW tipo 1, a continuación, se debe configurar la velocidad de la onda transversal del ultrasonido del material base, para ello se utiliza el bloque con notch elaborado del mismo material de la tubería a inspeccionar, en el Anexo A se puede apreciar la velocidad del sonido para ciertos materiales los mismos que se toma como referencia para corroborar esta configuración.

Como paso siguiente se ajusta la sensibilidad para ello hay que asegurar que el pico del eco debido al retorno del haz ultrasónico desde el notch en una vista A scan tenga un 80% de la altura de la pantalla; en su pico más alto, esta será la sensibilidad de referencia a la cual se efectúa la configuración del equipo.

Para efectuar la curva DAC (corrección de la amplitud en función de la distancia) se debe elaborar con un mínimo de tres reflectores, para el caso de tubería se debe tomar la muesca inferior en una sola pierna, la muesca superior con dos piernas y la muesca inferior nuevamente con tres piernas, similar a como se muestra en la Figura 17-2.

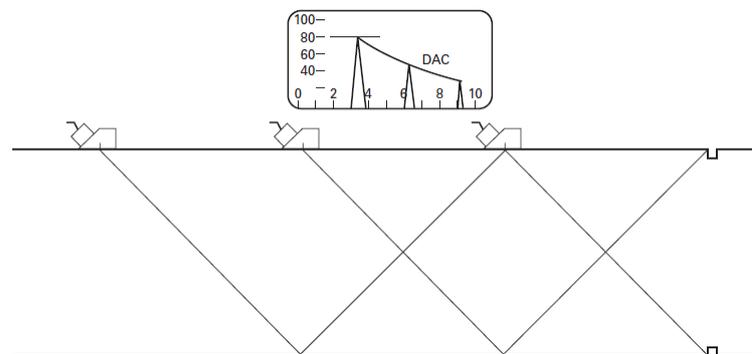


Figura 24-2: Posicionamiento del transductor para efectuar la curva DAC.

Fuente: (ASME section V: p.74).

En cada reflector se debe tomar la indicación del eco más alto, una vez que se haya tomado las indicaciones de los 3 reflectores se genera la curva DAC, y a la par se genera 2 curvas, una superior con un aumento de 6 dB y una inferior con una disminución de 6 dB con respecto a la curva original, cualquier indicación que se encuentre dentro de éste rango deberá ser examinada.

En la Figura 18-2 se presenta una vista en A-scan común de este ensayo.

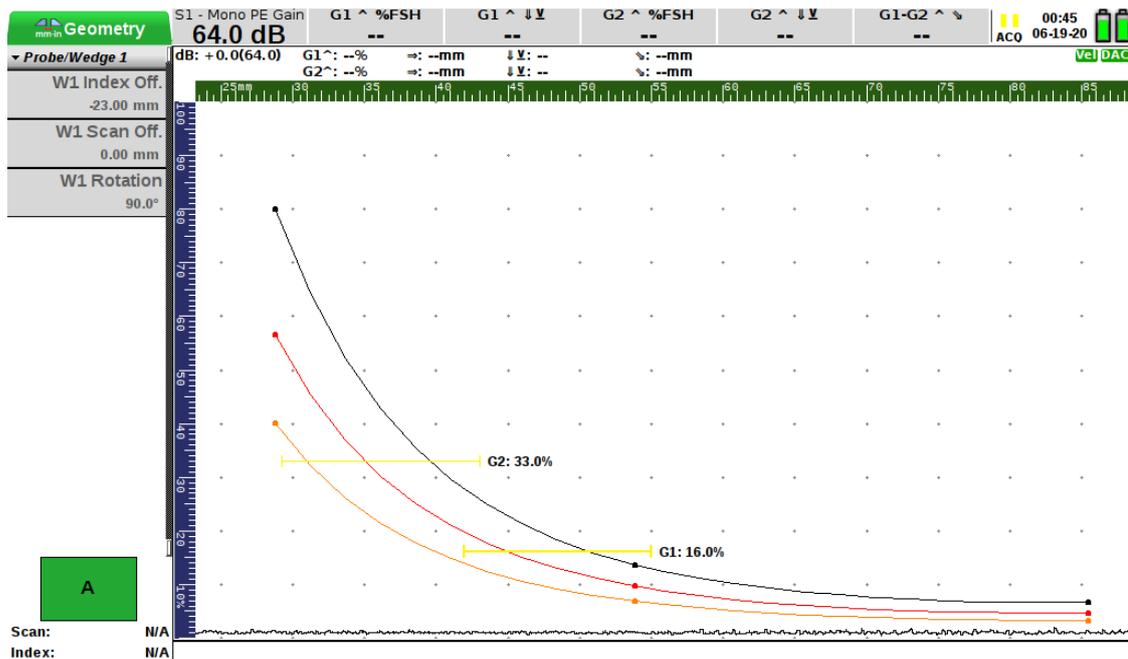


Figura 25-2: Vista A-scan – UT convencional.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.4.2 Calibración de los equipos para ultrasonido arreglo de fases manual.

La calibración de los equipos para este tipo de ultrasonido es similar a la configuración del ultrasonido convencional con la diferencia de que no se realiza para un haz de un solo ángulo sino para una gama de ángulos, los que por recomendación de los fabricantes de los equipos y accesorios deben estar en el rango de 35 a 72 grados.

Para efectuar una configuración idónea del equipo se inicia configurando la velocidad del sonido; para ello se necesita de dos ecos de referencia de dos longitudes de ruta diferentes en este caso se toman los notch interior y exterior como ecos de referencia. El retardo de la zapata compensa el desgaste de la cuña, los errores de velocidad y en algunos casos también los errores de angulación en la cuña.

En cuanto a la sensibilidad de referencia, se desea obtener la misma para todos los ángulos y leyes focales; según el código API 1104 debe ser del 80% de la altura de la pantalla $\pm 5\%$ y se utiliza como reflector el notch interno. La curva TCG (corrección de la ganancia en función del tiempo); tiene como objetivo lograr la misma sensibilidad con profundidad en el material, esto es fundamental para el dimensionamiento de discontinuidades que se basan en la amplitud, y se realiza con al menos 3 reflectores, para el caso de tubería se debe tomar la muesca inferior en

una sola pierna, la muesca superior con dos piernas y la muesca inferior nuevamente con tres piernas, similar a como se muestra en la Figura 17-2.

2.4.3 Calibración de los equipos para ultrasonido arreglo de semiautomático.

Para calibrar este tipo de técnica, es necesario realizar un plan de barrido que consiste en establecer la separación del transductor al centro de la soldadura y la apertura idónea de los ángulos de inicio y fin de scan con la finalidad de que a cierta distancia del centro de la soldadura se pueda inspeccionar toda la cara de fusión sin necesidad de mover al transductor alejándolo o acercándolo del cordón de soldadura. En la Figura 19-2 se muestra el plan de barrido para el caso de estudio, es a esta distancia que el transductor debe permanecer constante mientras se realiza el movimiento de avance a lo largo de la soldadura.

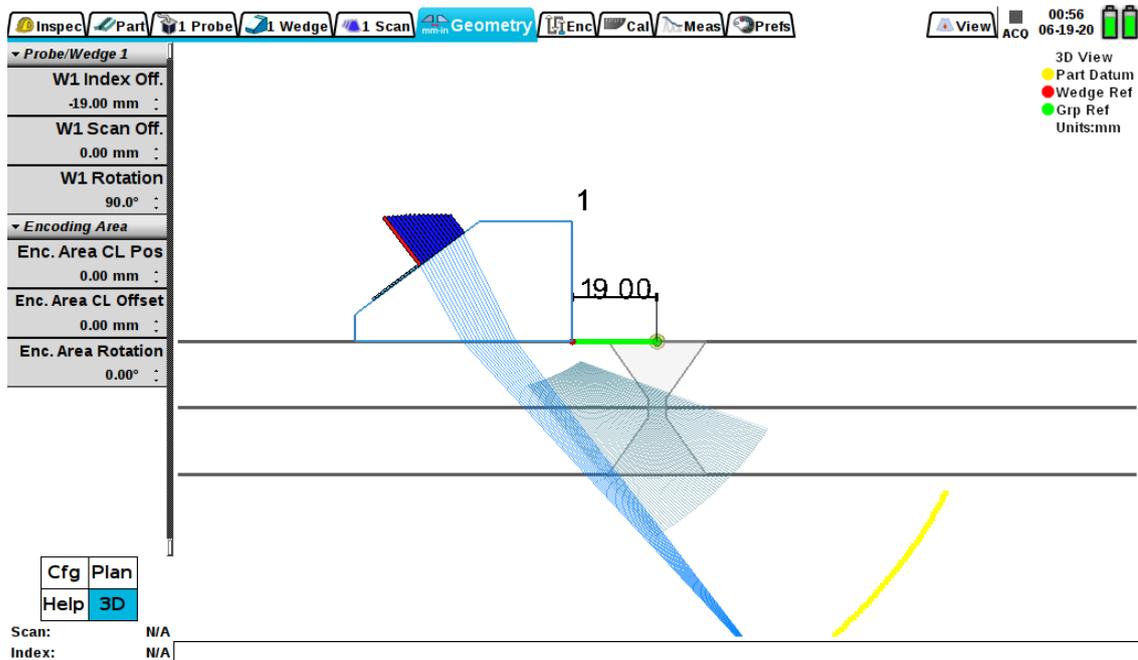


Figura 26-2: Plan de escaneo.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Se debe también calibrar el encoder, para tuberías se recomienda tomar la medida del perímetro y con esa distancia realizar la calibración en la misma tubería a inspeccionar, se debe tener cuidado al momento de realizar la inspección ya que puede presentarse el caso de que el encoder llegue a desconfigurarse y el avance por revolución pueda ser mayor o menor dando la ubicación errónea de la discontinuidad con respecto al origen de la inspección y una longitud de la discontinuidad también errada, Es una buena práctica controlar la longitud de la soldadura (perímetro de la tubería) con la longitud que registra el encoder al final de cada inspección.

Según el código ASME sección V el movimiento del codificador en una distancia de 20 pulg. (500 mm). La distancia de visualización en el equipo debe estar dentro del 1% de la distancia real recorrida

2.4.4 Calibración de los equipos para ultrasonido TOFD.

Para este tipo de técnica es necesario la utilización de dos transductores por lo que primeramente se calcula la separación entre centros acorde a la siguiente formula.

$$PSC = 2 \cdot d \cdot tg(\theta) \quad (18)$$

Dónde:

d Es la intersección del haz (2/3 del espesor de pared)

θ Es el ángulo de incidencia del haz

$$PSC = 2 * \frac{2}{3} (15.09) * tg(70^\circ)$$

$$PSC = 55 \text{ mm}$$

En la Figura 20-2 se presenta la separación de los transductores de TOFD para el presente proyecto.

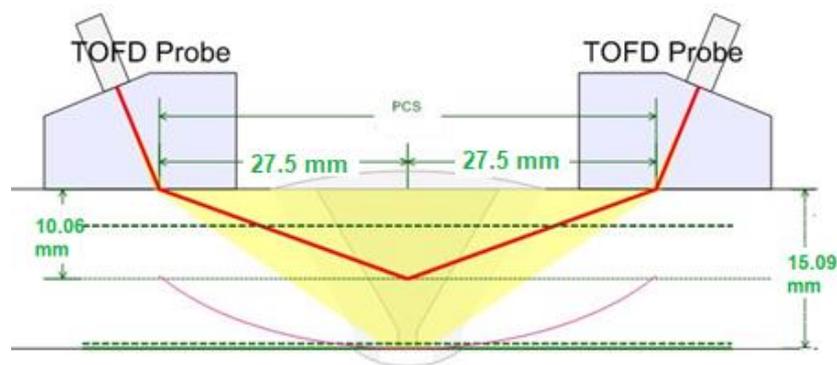


Figura 27-2: PSC separación entre centros.

Realizado por: Trujillo, Manuel, 2021.

Establecida y fijada la separación de los transductores se debe configurar el control de la ganancia del equipo de modo que la amplitud de la onda lateral sea del 40% al 90% de la altura de la pantalla completa (FHS) y el nivel de interferencia sea del 5% al 10%.

2.5 Inspección ultrasónica de las juntas soldadas.

En este ítem se efectúa la inspección de las juntas soldadas mediante la aplicación de las diferentes técnicas de ultrasonido, se anotará las discontinuidades encontradas en cada junta inspeccionada para su posterior análisis. Es necesario acotar que la inspección realizada va enfocada a determinar la probabilidad de detección de discontinuidades presentan las diferentes técnicas de inspección, por lo que las probetas realizadas para el estudio contienen discontinuidades muy próximas entre sí, las que bajo el criterio del código API 1104 para acumulación de discontinuidades todas las indicaciones evaluadas de la probeta serán clasificadas como defectos por tal motivo no se realizará esta evaluación, sin embargo se dejará constancia del tamaño (ubicación, longitud y altura) y tipo de cada discontinuidad.

2.5.1 Inspección mediante ultrasonido pulso-eco convencional en haz angular.

Antes de realizar el ensayo se debe realizar una limpieza mediante grata a cada lado de la soldadura, se debe marcar el área de desplazamiento del transductor la misma que se estableció desde 23 mm hasta 64 mm tomando como referencia el centro del cordón de soldadura cubriendo toda el área del bisel de la junta, como se establece en la Figura 21-2.

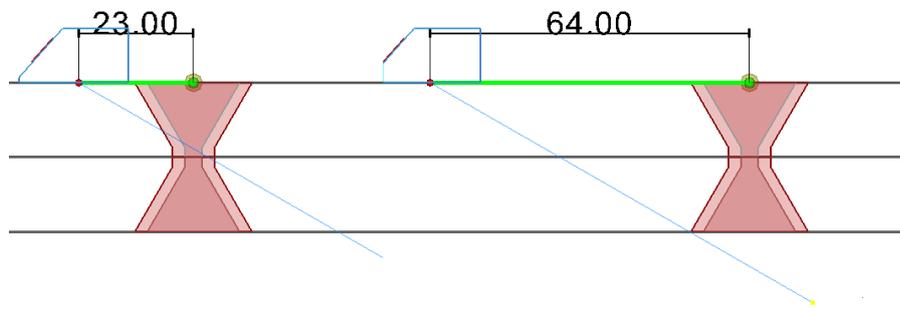


Figura 28-2: Desplazamiento del transductor.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Se marca un origen y un sentido de avance de la inspección con la finalidad de tener un punto fijo de referencia para que cuando una discontinuidad sea detectada se mida desde el punto de origen hasta la discontinuidad siguiendo el sentido de la inspección, este origen y dirección de avance del test servirá como referencia para el resto de ensayos.

Se anota todas las discontinuidades presentes en cada soldadura y sus características más importantes, como son longitud, altura, ubicación con respecto al diámetro exterior de la tubería y ubicación respecto al origen de inspección.

Para evaluar la altura y la longitud de las discontinuidades se hace uso de la técnica de caída a de los 6dB la misma que consiste en maximizar la indicación de discontinuidad (encontrar su eco más alto), se desplaza el transductor en una dirección y se detiene el movimiento en el momento que el eco sufra una caída de amplitud al 50% (con respecto al eco más alto), esto es equivalente a disminuir 6dB en la ganancia del equipo. Se asume que la indicación cae a la mitad de amplitud cuando la parte central del haz se encuentra en el extremo de la discontinuidad, esto es, se está detectando el borde de la discontinuidad.

En la tubería se anota el inicio y fin de cada discontinuidad y posteriormente con una cinta se procederá a medir la ubicación de la misma con respecto al punto de origen. La longitud total de inspección por cada junta es de 856 mm y corresponde al perímetro de la tubería. En el Anexo M se puede apreciar las discontinuidades detectadas mediante el ensayo de ultrasonido pulso-eco convencional con haz angular para cada probeta inspeccionada.

2.5.2 Inspección mediante ultrasonido arreglo de fases manual.

Se parte del origen y el sentido de avance que se estableció en la inspección por ultrasonido convencional en haz angular, se procede a inspeccionar la junta realizando un desplazamiento del transductor y anotando las indicaciones presentes. La configuración típica de la pantalla para realizar esta inspección en tiempo real es un scan sectorial denominado S-scan, y un A-scan como se puede apreciar en la Figura 22-2.

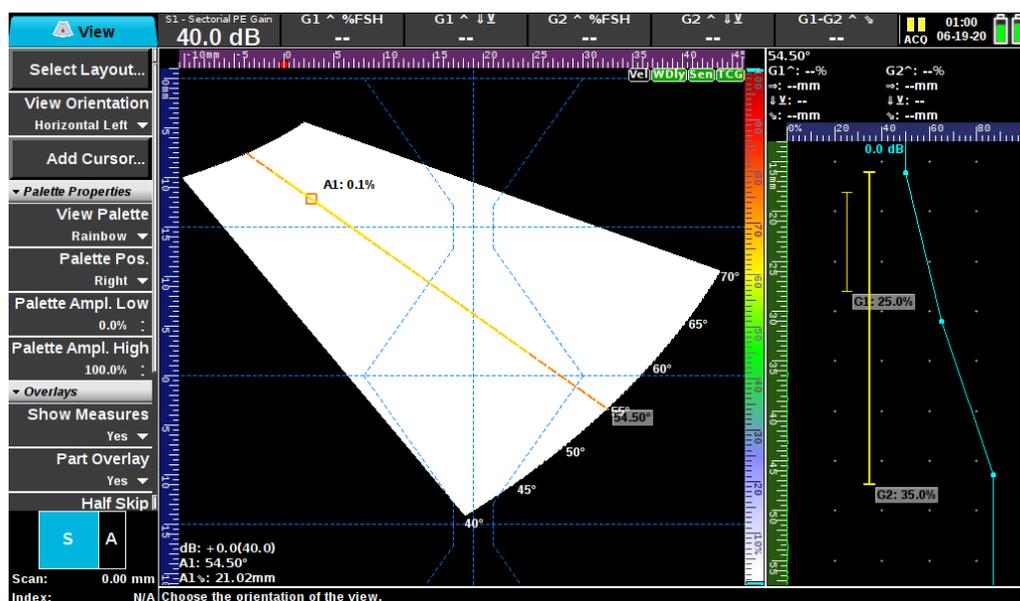


Figura 29-2: Configuración de la pantalla del equipo para arreglo de fases.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Para el dimensionamiento de las discontinuidades se procede a utilizar la técnica de la caída de los 6dB, maximizando el eco en la vista A scan, como se muestra en la Figura 23-2 donde se aprecia el dimensionamiento de un agujero de 1.5mm de diámetro, y que está ubicado a 10mm de profundidad, en la parte A se muestra el agujero y el equipo, a la derecha en la parte B se maximiza la señal y se obtiene la profundidad que para este caso sería 9.92mm , en la parte C se mueve el cursor hacia el ángulo de mayor apertura hasta tener una caída del 50% en la altura de la pantalla para identificar el extremo inferior que está a 9.17mm y en la parte D se mueve el cursor hacia el ángulo de menor apertura del sectorial para identificar el extremo superior que está a 10.57mm realizando una resta puedo saber la altura de la discontinuidad que será de 1.4mm.

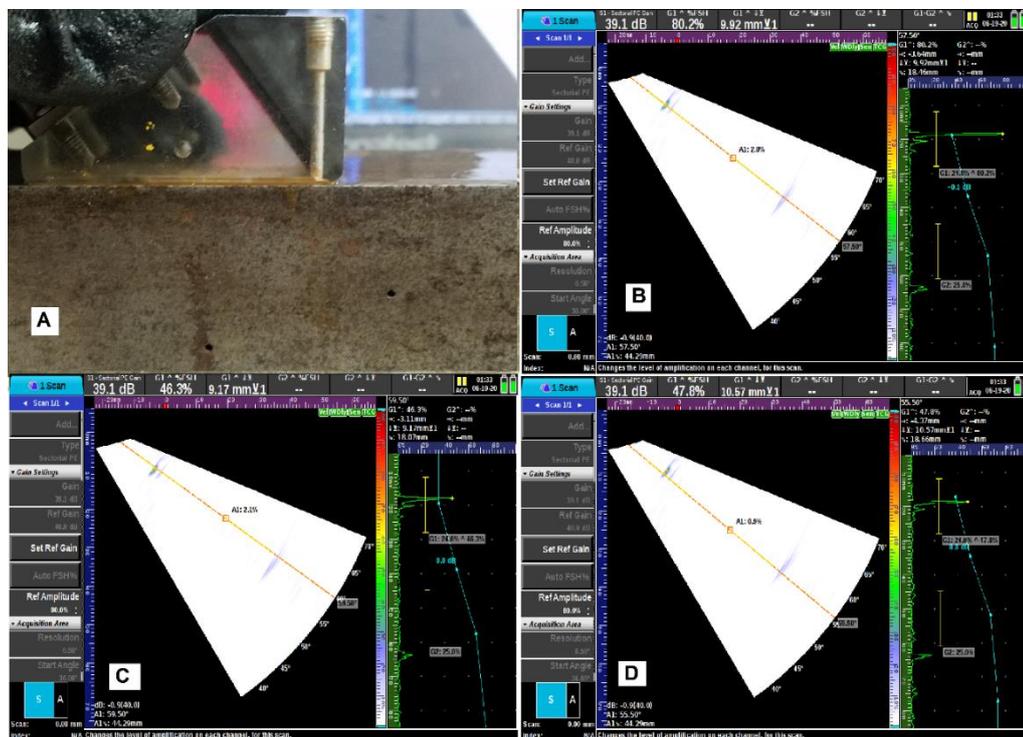


Figura 30-2: Técnica de la caída de los 6dB.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Para obtener la longitud se marca en la tubería el inicio y fin de cada discontinuidad y posteriormente con una cinta métrica se procede a su dimensionamiento y a anotar la distancia con relación al origen (inicio) de la inspección.

En el Anexo N se puede apreciar las discontinuidades detectadas mediante el ensayo de ultrasonido arreglo de fases manual para cada probeta inspeccionada.

2.5.3 Inspección mediante ultrasonido arreglo de fases semiautomático.

Se debe establecer la distancia desde el centro de la soldadura al inicio del transductor como se puede apreciar en la Figura 19-2, se traza una línea continua que servirá como guía para el avance del transductor.

La longitud para guardar la corrida de la junta es de 906mm esto quiere decir 50 mm más del perímetro de la tubería esto se efectúa para tener un espacio de transición en el inicio y fin de la soldadura.

Se procede a realizar el escaneo de la junta tomando en consideración que el origen marcado debe estar en la mitad de la cara del transductor, terminada la inspección se guarda el archivo digital y posteriormente se procede a la evaluación de la junta.

En el Anexo O se puede apreciar el detalle de las discontinuidades detectadas mediante el ensayo de ultrasonido arreglo de fases semiautomático para cada probeta inspeccionada.

2.5.4 Inspección mediante ultrasonido TOFD.

Se posiciona el par de transductores de TOFD a la separación entre los extremos de las zapatas de 39mm (separación de centros de 55mm) como se detalla en la Figura 24-2.

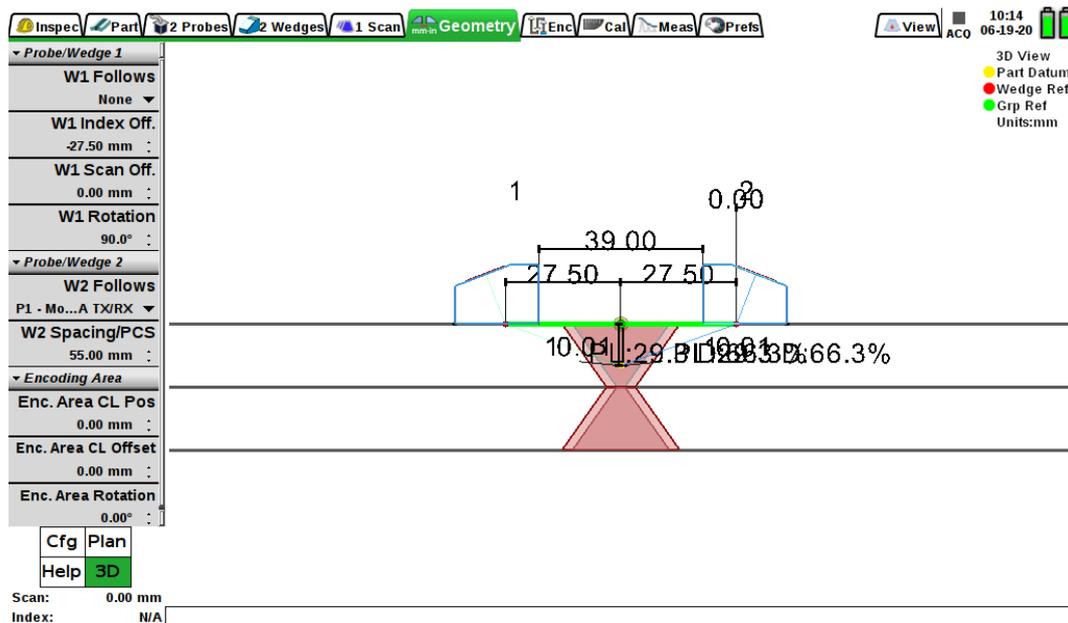


Figura 31-2: Configuración de la distancia entre centros.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

La longitud para guardar la corrida de la junta es de 906mm y se procede a realizar el escaneo de la junta tomando en consideración que el origen marcado se guarda el archivo digital y posteriormente se procede a la evaluación de la junta.

En el Anexo P se puede apreciar las discontinuidades detectadas mediante el ensayo TOFD para cada probeta inspeccionada.

2.6 Verificación de las discontinuidades inducidas.

Con el fin de evaluar la probabilidad de detección de discontinuidades que presentan las diferentes técnicas de ultrasonido, se debe establecer las discontinuidades reales presentes en la soldadura; para ello se procederá a realizar una inspección visual a fin de determinar discontinuidades que sean visibles al ojo humano como son faltas de penetración, discontinuidades en la raíz y en el pase de la soldadura tal y como se puede evidenciar en la Figura 25-2, se toma registro de las discontinuidades y posteriormente se procede a la ruptura de las probetas para verificar las discontinuidades internas.



Figura 32-2: Inspección visual.

Realizado: Trujillo Manuel, 2021.

2.6.1 Ruptura de las probetas.

Para poder evaluar las discontinuidades internas, se procede a efectuar la ruptura de las probetas mediante amolado según se muestra en la Figura 26-2, se realizarán múltiples desbastes tratando de que la profundidad en cada desbaste no sea mayor a 2mm.

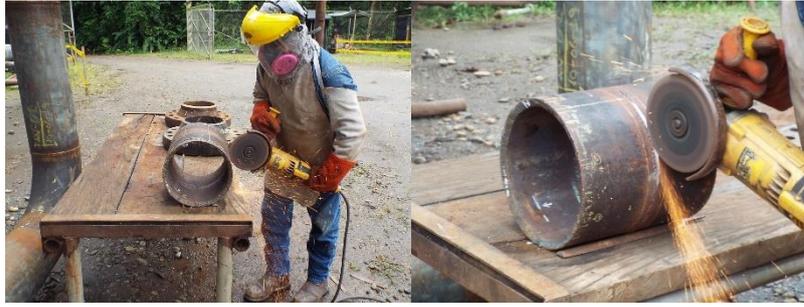


Figura 33-2: Proceso de ruptura de las probetas.

Realizado: Trujillo Manuel, 2021.

En cada desbaste efectuado, se realizará una inspección visual minuciosa del área, para detectar discontinuidades como se observa en la Figura 27-2 y cuando esto no sea posible, luego de cada pase de desbaste, se efectuará el ensayo de líquidos penetrantes para descartar la presencia de discontinuidades que no puedan ser apreciadas visualmente. De esta manera se inspeccionará cada junta y se anotaran las discontinuidades encontradas mismas que se muestran en la Tabla 11-2.



Figura 34-2: Inspección visual del área de corte.

Realizado: Trujillo Manuel, 2021.

Se deberá verificar la guía de discontinuidades que se realizó al momento de soldar las probetas, para de esta manera tener un mayor cuidado en dichas zonas al momento de realizar el proceso de desbaste. El objetivo es tratar de identificar el 100% de las discontinuidades que fueron inducidas,

2.6.2 Inspección por líquidos penetrantes.

Después de realizado el desbaste se debe inspeccionar visualmente, no obstante, si en dicha inspección no se logra distinguir alguna discontinuidad, pero la guía realizada previamente de las discontinuidades que se prevé inducir (Tabla 9-2) indique lo contrario, se procede a efectuar

una examinación mediante líquidos penetrantes (Figura 35-2), siguiendo los criterios del código ASME sección V.



Figura 35-2: Inspección mediante líquidos penetrantes.

Realizado: Trujillo Manuel, 2021.

El ensayo se efectúa mediante líquido penetrante coloreado, visible y removible con solvente, se utiliza materiales de la marca MAGNAFLUX, en la Tabla 11-2 se muestra las principales variables del ensayo por líquidos penetrantes.

Tabla 10-2: Variables del ensayo de líquidos penetrantes.

	Removedor	Penetrante	Revelador
Codificación:	SKC-S	SKL-SP1	SKD-S2
Marca:	MAGNAFLUX		
Tipo:	II (Líquido penetrante coloreado visible)		
Método:	C (Removible con solvente)		
Tiempo de penetración:	10 min		
Tiempo de revelado	10 min		

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Antes de aplicar el penetrante, la superficie a inspeccionar debe estar libre de limallas o cualquier otro contaminante y que tenga un acceso fácil para realizar la remoción del exceso del penetrante.

Luego de la limpieza de la zona, se aplica el penetrante cuyo tiempo de penetración será de 10 min, pasado dicho tiempo, se remueve el exceso del mismo con la ayuda de papel limpiador industrial, posteriormente se humedece ligeramente un poco de papel con removedor y se procede a realizar la última remoción del penetrante (evitar humedecer mucho el papel para evitar la remoción del penetrante de las discontinuidades); finalmente se aplica el revelador, el mismo que debe estar por lo menos a 30cm del área a inspeccionar, la aplicación del revelador debe ser lo más homogénea posible, evitando el humedecimiento de la zona a examinar, ya que

el revelador puede actuar como removedor. Transcurridos los 10 min que dura el proceso de revelado, se visualiza el área en busca de zonas donde el revelador extraiga el penetrante de la discontinuidad, se anotará las indicaciones encontradas en cada junta.

Tabla 11-2: Discontinuidades determinadas mediante ruptura de las probetas.

Probetas	Tipo de discontinuidad	Detalle de ubicación de la discontinuidad (mm)	
		Desde	Hasta
Junta 1	IF	0	20
	P	30	32
	IF	80	130
	ESI	150	180
	IC	190	194
	UI	205	210
	IP	390	400
	P	408	409
	P	704	705
	P	790	791
	ESI	809	820
	IF	840	856
Junta 2	IF	10	45
	ESI	85	130
	P	164	165
	IC	215	220
	P	305	307
	IP	325	335
	C	355	400
	P	458	460
	IF	585	620
	IF	665	715
	ISI	810	815
	IF	844	850
Junta 3	IP	15	25
	UI	75	80
	CP	110	130
	IF	155	170
	IF	245	255
	UI	338	341
	IP	400	425
	IF	620	659
	ISI	803	808
	IF	840	856
Junta 4	UI	89	94
	P	107	109
	ESI	144	162
	BT	200	210
	P	253	254
	IC	300	306
	P	458	459.44
	IP	618	671
	IF	695	702
	IP	818	829

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Tabla 11-2: Discontinuidades determinadas mediante ruptura de las probetas (continuación).

Probetas	Tipo de discontinuidad	Detalle de ubicación de la discontinuidad (mm)	
		Desde	Hasta
Junta 5	IF	2	11
	IP	16	51
	IF	53	60
	UE	69	72
	P	84	88
	P	107	109
	IF	125	203
	IP	262	321
	UI	407	410
	UE	503	508
	ISI	795	804
	P	827	829
Junta 6	IF	7	12
	IP	16	67
	IF	78	84
	UE	86	90
	IF	126	158
	CP	175	184
	IF	297	324
	ESI	572	576
	P	620	622
	ESI	688	728
	ISI	755	760
	IF	790	815
IP	836	842	

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

2.6.3 Compendio general de discontinuidades.

En base a la ruptura de las 6 probetas examinadas, las 69 discontinuidades encontradas, se las ha agrupado en un compendio general como se puede observar en la Tabla 12-2.

Tabla 12-2: Resumen de las discontinuidades inducidas.

Tipo de discontinuidad	Nomenclatura	Discontinuidades
Fisura longitudinal	C	1
Falta de penetración	IP	10
Falta de fusión	IF	20
Inclusiones de escoria alargada	ESI	6
Inclusiones de escoria aislada	ISI	4
Porosidad agrupada	CP	2
Porosidad aislada	P	14
Socavación externa	UE	3
Socavación interna	UI	5
Concavidad interna	IC	3
Quemadura transversal	BT	1
Total		69

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

CAPÍTULO III

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo, se realizará una comparación entre las discontinuidades conocidas tradicionalmente y las que el código API 1104 adopta para el ensayo de ultrasonido. Aborda la probabilidad de detección de las distintas discontinuidades que se pueden suscitar en una soldadura, efectuando una comparación entre las técnicas de ultrasonido como son: convencional en haz angular, arreglo de fases manual, arreglo de fases semiautomático y TOFD.

3.1 Discontinuidades detectadas mediante las técnicas de ultrasonido.

Una vez realizada la inspección, se obtuvieron los siguientes resultados que son representados en la Tabla 1-3 y en el Gráfico 1-3.

Tabla 1-3: Discontinuidades detectadas mediante ultrasonido por junta soldada.

# de junta	Ruptura de probetas	UT	PAUT	SAUT	TOFD
Junta 1	12	9	9	11	9
Junta 2	12	9	9	10	9
Junta 3	10	8	8	9	7
Junta 4	10	5	6	6	5
Junta 5	12	6	7	9	9
Junta 6	13	11	12	12	11
Total	69	48	51	57	50

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

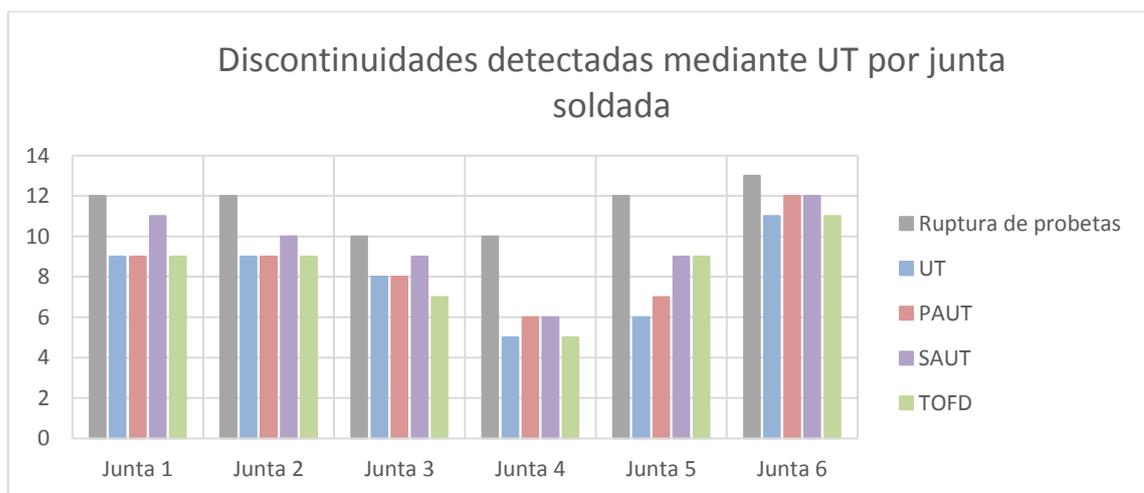


Gráfico 1-3: Discontinuidades detectadas mediante ultrasonido por junta soldada.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

En ellos se puede observar que: el ultrasonido convencional en haz angular, evidenció un total de 48 discontinuidades, mientras que, el ultrasonido arreglo de fases manual detectó un total de 51 discontinuidades, por otra parte, el ultrasonido arreglo de fases semiautomático pudo determinar la cantidad de 57 discontinuidades, y finalmente, el ultrasonido TOFD divisó la presencia de 50 discontinuidades en las probetas de soldadura, éstos datos se encuentran detallados en los Anexos M, N, O y P.

3.2 Análisis de resultados.

Para determinar la técnica que mejor identifica las discontinuidades en juntas soldadas, se debe realizar un análisis comparativo entre las técnicas de ultrasonido en estudio, calculando la probabilidad de detección de discontinuidades que tienen cada una de las técnicas, para ello, es necesario conocer la relación que tienen las discontinuidades citadas en el código API 1104 con las indicaciones por ultrasonido.

3.2.1 Relación entre discontinuidades citadas en el código API 1104 e indicaciones generadas por los ensayos de UT.

En la Tabla 2-3, se efectúa un resumen de las diferentes discontinuidades presentes en la soldadura y el tipo de indicación generaron las mismas en los diferentes ensayos de ultrasonido.

Tabla 2-3: Relación entre discontinuidades citadas por código API 1104 e indicaciones por UT

Tipo de discontinuidad		Tipo de indicación según API 1104 para UT			
# de junta	Según ruptura de probetas	UT	PAUT	SAUT	TOFD
junta 1	IF	LB	LB	LB	LB
	P	*	*	LB	VI
	IF	LB	LB	LB	LB
	ESI	LB	LB	VR	LB
	IC	*	*	*	*
	UI	*	*	VR	*
	IP	LS	LS	LS	LS
	P	VI	VI	VI	VI
	P	VI	VI	VI	VI
	P	VI	VI	VI	VI
	ESI	LB	LB	LB	*
	IF	LB	LB	LB	LB

*La discontinuidad no se evidenció en el ensayo ultrasónico respectivo

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Tabla 2-3: Relación entre discontinuidades citadas por código API 1104 e indicaciones por UT (continuación).

Tipo de discontinuidad		Tipo de indicación según API 1104 para UT			
# de junta	Según ruptura de probetas	UT	PAUT	SAUT	TOFD
junta 2	IF	LS	LS	LS	LS
	ESI	LB	LB	LB	LB
	P	VI	VI	VI	VI
	IC	*	*	*	*
	P	VI	VI	VI	VI
	IP	LS	LS	LS	LS
	C	LS	LS	LS	LS
	P	*	*	*	*
	IF	LB	LB	LB	LB
	IF	LB	LB	LB	LB
	ISI	*	*	VI	*
	IF	VI	VI	VI	VI
junta 3	IP	LS	LS	LS	*
	UI	*	*	LS	*
	CP	VC	VC	VC	VC
	IF	LB	LB	LB	LB
	IF	LB	LB	LB	LB
	UI	*	*	*	*
	IP	LS	LS	LS	LS
	IF	LS	LS	LS	LS
	ISI	VI	VI	VI	VI
	IF	LS	LS	LS	LS
junta 4	UI	*	VR	VR	VR
	P	VI	VI	VI	VI
	ESI	LB	LB	LB	LB
	BT	*	*	*	*
	P	*	*	*	*
	IC	*	*	*	*
	P	*	*	*	*
	IP	LS	LS	LS	LS
	IF	LS	LS	LS	LS
	IP	LS	LS	LS	*

*La discontinuidad no se evidenció en el ensayo ultrasónico respectivo

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Tabla 2-3: Relación entre discontinuidades citadas por código API 1104 e indicaciones por UT (continuación).

Tipo de discontinuidad		Tipo de indicación según API 1104 para UT			
# de junta	Según ruptura de probetas	UT	PAUT	SAUT	TOFD
	IF	VR	VR	VR	VR
	IP	LS	LS	LS	LS
	IF	LB	LB	LB	LB
	UE	*	VI	VI	*
	IF	LB	LB	LB	LB
	CP	LB	LB	LB	LB
junta 6	IF	LB	LB	LB	LB
	ESI	VI	VI	VI	VI
	P	*	*	*	VI
	ESI	LB	LB	LB	LB
	ISI	VI	VI	VI	VI
	IF	LB	LB	LB	LB
	IP	LS	LS	LS	*

*La discontinuidad no se evidenció en el ensayo ultrasónico respectivo

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

La Tabla 2-3, nos permite relacionar las discontinuidades más comunes mencionadas en el código API 1104 con las indicaciones generadas por el ensayo de ultrasonido, ésta comparación ayudará a la academia para una fácil deducción del tipo de discontinuidad que se está estudiando.

- Fisura longitudinal (C), las indicaciones dadas por los ensayos de ultrasonido corresponden al tipo lineal superficial (LS).

- Penetración incompleta (IP), al igual que en la fisura longitudinal, las indicaciones generadas por el ensayo de ultrasonido para este tipo de discontinuidad son las indicaciones lineales superficiales (LS).

- Falta de fusión (IF), las indicaciones dadas por los ensayos de ultrasonido varían, pero en su mayoría son indicaciones lineales superficiales (LS) y sub superficiales (LB), salvo la junta 2 que en la ruptura de la junta se evidenció una discontinuidad tipo falta de fusión pero en el ensayo de ultrasonido corresponde a una indicación volumétrica individual y en la junta 6 que en la ruptura de la junta se evidencia una discontinuidad tipo falta de fusión pero en el ensayo de ultrasonido corresponde a una indicación volumétrica en la raíz de la soldadura.

- Inclusiones de escoria alargada (ESI), las indicaciones dadas por el ensayo de ultrasonido corresponden a indicaciones lineales sub superficiales (LB) en su mayoría, salvo para la junta 1, en la misma que para el ensayo de ultrasonido semiautomático se visualiza una indicación tipo volumetría en raíz (VR) y en la junta 6 donde los ensayos de ultrasonido muestran una indicación volumétrica individual.

- Inclusiones de escoria aislada (ISI), todos los ensayos de ultrasonido muestran una indicación volumétrica individual.

- Porosidad Agrupada (CP), los ensayos de ultrasonido mostraron 2 tipos de indicaciones, volumétricos agrupados (VC) e indicaciones lineales sub superficiales (LB).

- Porosidad aislada (P), todos los ensayos de ultrasonido presentan indicaciones volumétricas individuales (VI).

- Socavación externa (UE), todos los ensayos de ultrasonido presentan indicaciones volumétricas individuales (VI).

- Socavación interna (UI), todos los ensayos de ultrasonido presentan indicaciones volumétricas en la raíz (VR), la junta 3 presenta una indicación lineal sub superficial (LB) donde se evidencia una socavación interna.

- Concavidad interna (IC) y Quemadura transversal (BT), el ensayo de ultrasonido no pudo obtener una indicación durante el ensayo.

En base a esta comparación, se puede obtener la cantidad de discontinuidades detectadas por cada uno de los distintos tipos de ultrasonido en función al tipo de discontinuidad, estos valores se los puede evidenciar en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Discontinuidades detectadas por UT.

Tipo de discontinuidad	Discontinuidades detectadas por UT			
	UT	PAUT	SAUT	TOFD
Fisura longitudinal	1	1	1	1
Falta de penetración	10	10	10	7
Falta de fusión	20	20	20	20
Inclusiones de escoria alargada	6	6	6	5
Inclusiones de escoria aislada	3	3	4	3
Porosidad agrupada	2	2	2	2
Porosidad aislada	6	6	9	11
Socavación externa	0	2	2	0
Socavación interna	0	1	3	1
Concavidad interna	0	0	0	0
Quemadura transversal	0	0	0	0
Total	48	51	57	50

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

3.2.2 *Porcentaje de detección por tipo de discontinuidad.*

La capacidad de detección que presenta cada técnica de ultrasonido se la evaluó mediante las discontinuidades detectadas por las diferentes técnicas de ultrasonido (tabla 3-3), y las discontinuidades determinadas mediante la destrucción de las probetas (tabla 11-2).

Tabla 4-3: Porcentaje de detección por tipo de discontinuidad.

Tipo de discontinuidad	Discontinuidades detectadas por UT			
	UT	PAUT	SAUT	TOFD
Fisura longitudinal	100%	100%	100%	100%
Falta de penetración	100%	100%	100%	70%
Falta de fusión	100%	100%	100%	100%
Inclusiones de escoria alargada	100%	100%	100%	83%
Inclusiones de escoria aislada	75%	75%	100%	75%
Porosidad agrupada	100%	100%	100%	100%
Porosidad aislada	43%	43%	64%	79%
Socavación externa	0%	67%	67%	0%
Socavación interna	0%	20%	60%	20%
Concavidad interna	0%	0%	0%	0%
Quemadura transversal	0%	0%	0%	0%
Promedio	56%	64%	72%	57%

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la tabla 4-3 y en el Gráfico 2-3, se puede observar que las discontinuidades tipo fisura longitudinal (C), se detectan al 100% en las cuatro técnicas; falta de penetración (IP), solo la técnica TOFD presenta un 70% en relación a las demás técnicas en estudio, que presentan un porcentaje del 100%; falta de fusión (IF), son detectables al 100% por las 4 técnicas ultrasónicas; inclusiones de escoria alargada (ESI), son detectadas al 100%, a excepción de la técnica TOFD que presenta un 83%; inclusiones de escoria aislada (ISI), solo el arreglo de fases semiautomático las detecta al 100%, mientras que las demás técnicas las detectan en un 75%; porosidad agrupada (CP), es detectable al 100% por las 4 técnicas; porosidad aislada (P), la técnica que mejor grado de exactitud presenta en la detección de esta discontinuidad es el TOFD con un 79%, seguida del arreglo de fase semiautomático con un 64%, mientras que las dos técnicas restantes comparten un 43% de determinación; socavación externa (UE), es detectable al 67% con las técnicas de ultrasonido arreglo de fases manual y semiautomática, el ultrasonido convencional y el TOFD no pudieron determinar esta discontinuidad; socavación interna (UI), es detectable con mayor facilidad con el ultrasonido semiautomático con una probabilidad del 60%, mientras que, el arreglo de fases manual y el ultrasonido TOFD presentan un 20% y el ultrasonido convencional no detecta esta discontinuidad; concavidad interna y quemadura transversal no se detectó por ninguna de las técnicas de ultrasonido.

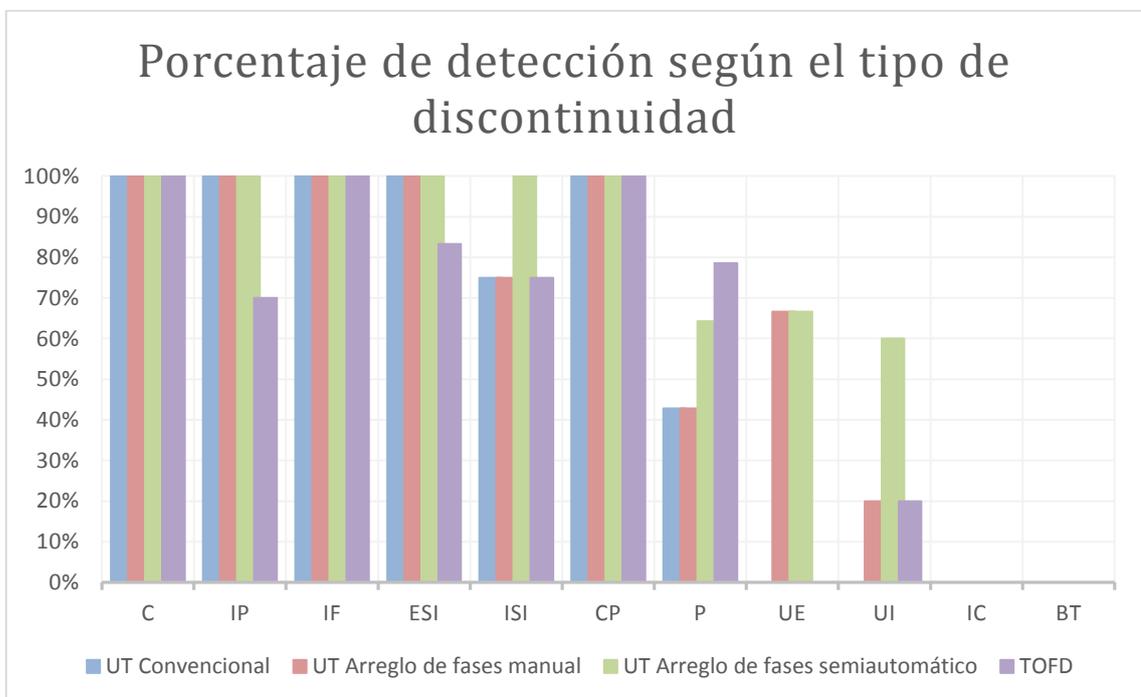


Gráfico 2-3: Capacidad de detección de las técnicas de ultrasonido por tipo de discontinuidad.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

3.2.3 Porcentaje de detección promedio.

El porcentaje de detección promedio se evalúa obteniendo el valor promedio de los porcentajes de detección determinados por el tipo de discontinuidad como se puede verificar al final de la Tabla 4-3 y se muestra esquemáticamente en el Gráfico 3-3.

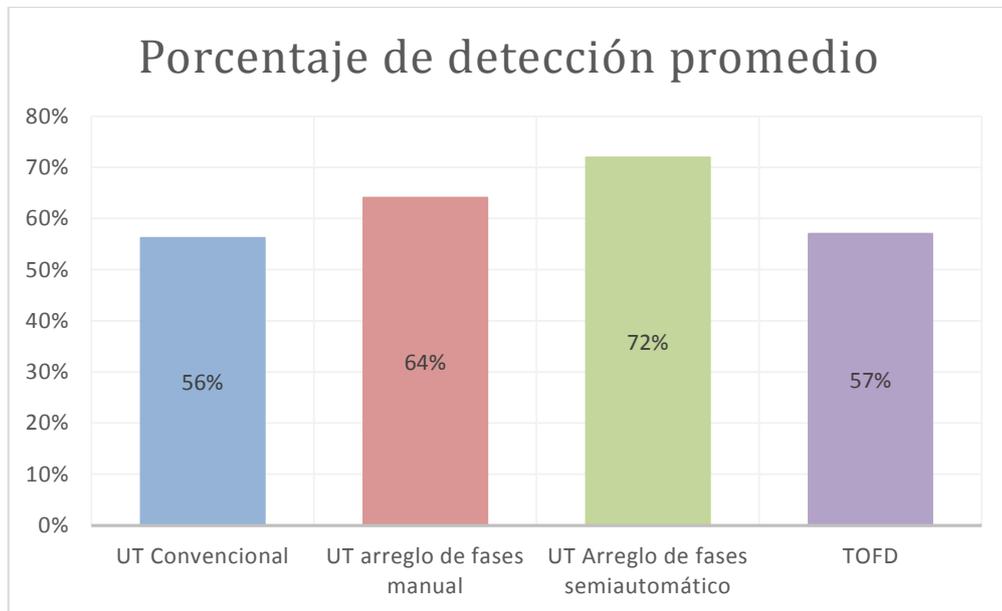


Gráfico 3-3: Capacidad de detección promedio de las técnicas de ultrasonido.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Se puede apreciar que, la técnica de ultrasonido semiautomático con arreglo de fases posee una mayor probabilidad de detección promedio de discontinuidades con un 72%, seguido de un 64% correspondiente a la técnica de ultrasonido con arreglo de fases manual, para posterior a éste, encontrar el ultrasonido TOFD con un 57% y por último tenemos al ultrasonido convencional con un 56%.

3.2.4 Porcentaje de detección total.

La capacidad de detección total se evalúa tomando el total de discontinuidades detectadas mediante las distintas técnicas de ultrasonido para el total de discontinuidades inducidas determinadas en la ruptura de las probetas, en el Gráfico 4-3 se muestra los resultados obtenidos para las diferentes técnicas de ultrasonido obteniendo en primer lugar con un 83% de probabilidad de detectar una discontinuidad al ensayo de ultrasonido arreglo de fases semiautomático, seguido del ultrasonido arreglo de fases manual con un 74% de probabilidad,

posteriormente el TOFD con una probabilidad del 72% y finalmente el ultrasonido convencional con un 70%.

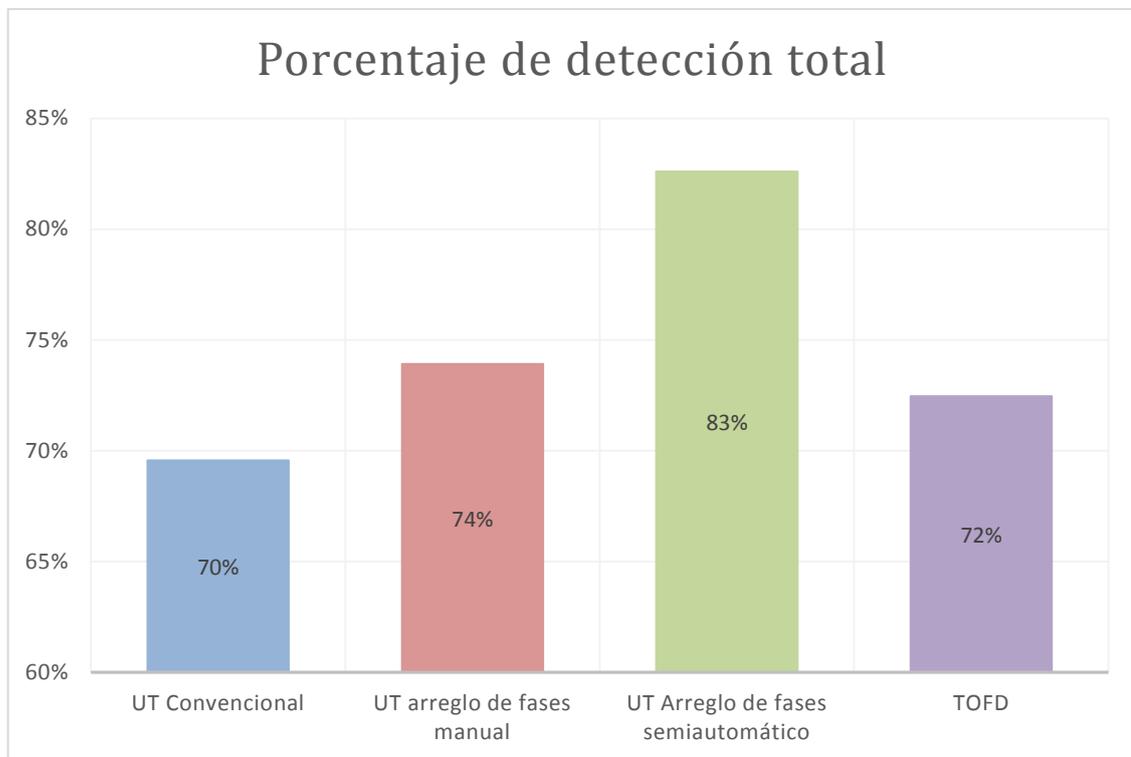


Gráfico 4-3: Capacidad de detección total de las técnicas de ultrasonido.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

3.3 Discusión de resultados.

En el proceso de elaboración de las probetas con discontinuidades inducidas, resulta difícil obtenerlas de manera precisa en cuanto al tamaño, ubicación y al tipo de imperfección, por esta razón no se pudo evaluar discontinuidades tales como fisuras transversales que son difíciles de obtener con el tipo de soldadura realizada.

De la ubicación y el tipo de la discontinuidad solo tenía conocimiento el personal encargado de realizarlas, el supervisor de soldadura tomó datos de la ubicación de las discontinuidades para posteriormente comparar con los resultados de los ensayos, el examinador no tenía conocimiento de dicha ubicación a fin de simular una condición cotidiana y que se asemeje lo mayor posible a la realidad.

En el proceso de ruptura de las probetas con las discontinuidades inducidas es probable que pequeñas discontinuidades puedan ser removidas y este error disminuiría la probabilidad de

detección de las técnicas de ultrasonido, se evidenció que discontinuidades pequeñas aisladas no se tenía una buena detección de las mismas.

Durante el proceso de inspección de la soldadura se pudo determinar patrones característicos en los ensayos de ultrasonido ocasionados por el haz de ultrasonido reflejado los mismos que se explicarán a continuación según el tipo de discontinuidad; se obvia la técnica de TOFD para este análisis debido a que esta técnica tiene imágenes predefinidas para las diferentes discontinuidades.

3.3.1 *Patrones característicos del haz ultrasónico.*

En el proceso de inspección de las juntas soldadas, se pudo determinar que, según el tipo de discontinuidad el ensayo de ultrasonido genera un patrón característico que permite tener una idea del tipo de discontinuidad con el cual se encontrando. Estos patrones son los que se detallan a continuación.

3.3.1.1 *Fisura longitudinal.*

De todas las discontinuidades presentes en la soldadura, las fisuras son las más críticas y en las que se debe tener mayor énfasis, las indicaciones tipo fisuras para el ultrasonido convencional, arreglo de fases manual y arreglo de fases semiautomático, la intensidad generada por el haz de ultrasonido reflejado es muy alto tanto así que pasa del 100% de la amplitud (Anexo Q) y se asemeja mucho a una indicación producida por una penetración incompleta.

3.3.1.2 *Penetración incompleta.*

La característica fundamental de este tipo de discontinuidad es su ubicación, ya que siempre va a estar presente en el pase de raíz y la intensidad que presenta está sobre el 85% de la amplitud (Anexo R), adicional, este tipo de discontinuidad presenta la característica de que se obtiene el mismo eco al inspeccionarla por los dos lados de la soldadura.

3.3.1.3 *Falta de fusión.*

La falta de fusión puede suscitarse en dos casos, falta de fusión entre pases y falta de fusión entre el material de aporte y el material base. La intensidad generada por el haz ultrasónico reflejado para los dos casos es mayor al 85% (Anexo S), pero cambia la ubicación de donde se encuentra. Para las indicaciones tipo falta de fusión entre el material base y el material de aporte

la ubicación está en el bisel de la soldadura y para la falta de fusión entre pases la ubicación de la discontinuidad está en la zona del material de aporte a la altura de disposición del metal acorde a las especificaciones del procedimiento de soldadura. Se puede también visualizar la indicación por los dos lados de la soldadura.

3.3.1.4 Inclusión de escoria.

Las inclusiones de escoria se pueden presentar en cualquier parte de la soldadura y generalmente la intensidad generada por el haz de ultrasonido reflejado no es mayor al 80% de la amplitud (Anexo T). En algunas ocasiones, cuando la escoria es alineada se tiende a confundir esta discontinuidad con el eco producido por la falta de fusión.

3.3.1.5 Porosidad aislada.

Las indicaciones generadas por poros suelen ser menores al 80% de la amplitud (Anexo U) y de tamaños pequeños, diferenciar entre una inclusión de escoria pequeña y un poro es difícil para el ensayo de ultrasonido.

3.3.1.6 Porosidad agrupada.

La indicación generada por un nido de poros varía dependiendo de la cantidad de poros presentes, el tamaño de los mismos y la proximidad entre estos, es así que cuando están muy próximos entre si la indicación suele parecer como un solo poro de mayor tamaño y en otras ocasiones se puede evidenciar los ecos de fondo de los poros presentes (Anexo V).

3.3.1.7 Socavación externa.

Esta indicación generalmente se la controla mediante el ensayo de inspección visual, las indicaciones correspondientes a socavaciones externas no exceden el 65% de la amplitud (Anexo W) y su posición es fija siempre va a presentarse en el pase de acabado de la soldadura y el material base, si la indicación excede del 80% de la amplitud se la considera como falta de fusión.

3.3.1.8 Socavación interna.

La indicación general por una socavación interna es la misma que la generada por la socavación externa (Anexo X) con la diferencia que la socavación interna su posicionamiento es en la parte interna de la soldadura entre el material de aporte y el material base, de igual manera si esta

indicación excede del 80% de la amplitud se debe pensar que no se trata de una socavación sino de una penetración inadecuada.

3.3.1.9 Concavidad interna y Quemadura transversal.

Para el estudio realizado no se pudieron detectar este tipo de discontinuidades.



Figura 1-3: Concavidad interna

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

Según el análisis de los datos, se puede decir que, la mejor técnica de inspección ultrasónica de entre las utilizadas en esta investigación para la inspección de soldadura corresponde al método de ultrasonido arreglo de fases semiautomático, la misma que obtuvo un 83% de probabilidad promedio para detectar discontinuidades. La ventaja que posee este método al dejar un registro digital de la inspección es minimizar el error humano, pero ¿a qué se refiere con error humano?, a todo aquello que pueda ser participe en la inspección como por ejemplo la luminosidad del día que no permite ver bien la pantalla del equipo, el cansancio del examinador en la inspección, una inspección muy rápida (que el ojo del examinador no pueda visualizar la indicación de la discontinuidad), al realizar una inspección con registro digital se realiza las inspecciones en campo y se puede evaluar la corrida en un computador con toda la comodidad del caso.

Entre las ventajas que presenta la técnica de inspección con registro digital se puede citar el tiempo de inspección, al realizar la inspección de las probetas de soldadura se pudo determinar que para una soldadura tubo a tubo de un diámetro nominal de 10in cédula 80, el tiempo de inspección mediante el ensayo de ultrasonido convencional es de aproximadamente 30 min, en el ensayo de arreglo de fases manual 20 min y en el ensayo de ultrasonido arreglo de fases con registro digital 8 min al igual que el TOFD.

Esta diferencia de tiempo se debe prácticamente a la aplicación de la técnica el ultrasonido convencional se debe señalar una área donde el transductor debe ser arrastrado de adelante hacia atrás en un movimiento de vaivén para inspeccionar toda la cara de fusión de la soldadura y efectuado por cada lado de la misma, en el ensayo mediante arreglo de fases manual el movimiento de vaivén es generado por el transductor por lo que este ya puede permanecer fijo a una cierta distancia del centro de la soldadura y electrónicamente el transductor emite una gama de haces de diferente ángulo que inspeccionan la soldadura pero el método de desplazamiento del transductor a lo largo de la soldadura aun es manual y se debe realizar a cada lado de la soldadura, en el ensayo de ultrasonido de arreglo de fases con registro digital o semiautomático los transductores están ubicados en un escáner el mismo que se adhiere a la tubería y el examinador solo debe ubicar bien el escáner y realizar su avance el equipo se encarga de registrar toda la data que deje la corrida, el ensayo mediante TOFD igual deja registro digital de la inspección y su tiempo es similar al ensayo descrito anteriormente.

Otro factor que acrecienta el tiempo de inspección es la dificultad para evaluar las indicaciones, el ensayo de ultrasonido convencional se presenta solamente una vista A scan por lo que las indicaciones se evaluarán en base a la amplitud y a la distancia a las que estén ubicadas. En la Figura 2-3 se puede observar los ecos típicos que se muestran para este tipo de soldadura, el primer eco corresponde al eco de raíz, el ultimo eco al eco de capa (estos ecos pueden desaparecer según como este la forma de la raíz y del refuerzo) y el intermedio es el eco de una discontinuidad; estos tres ecos nunca van a aparecer juntos en la imagen, se lo ha realizado así para explicar de forma didáctica la ubicación de los mismos y entender la zona donde se visualiza las discontinuidades.

Entre el eco de raíz y el de capa cualquier eco que se levante allí es la indicación de una discontinuidad, también se puede presentar el eco de una discontinuidad antes del eco de raíz y éste eco corresponde a una penetración incompleta. Debido a que el haz de ultrasonido tiene un ángulo fijo de reflexión, dificulta la visualización del eco de la discontinuidad, en estos casos se debe tener la paciencia de buscar detalladamente con el fin de ubicar el eco de la discontinuidad.

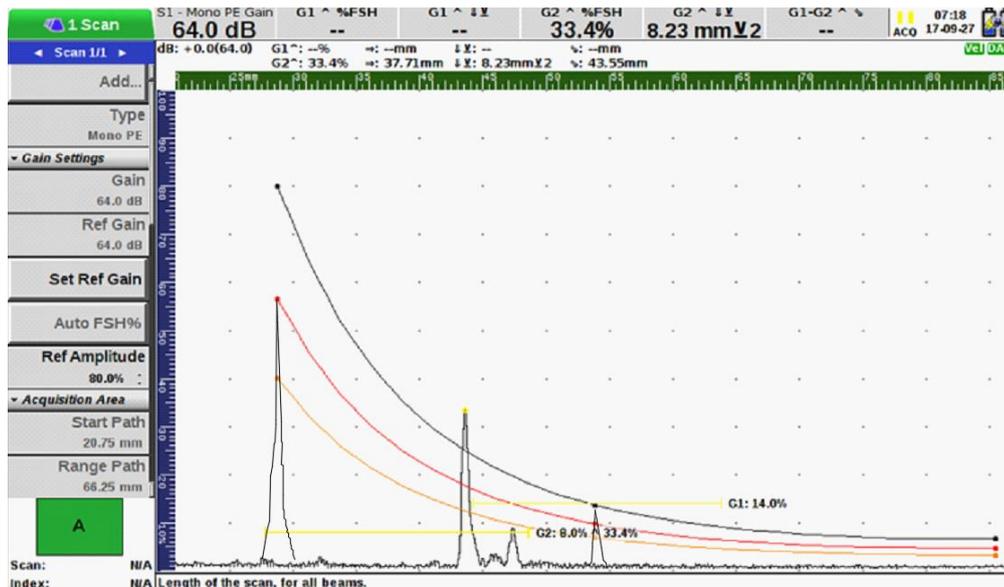


Figura 2-3: Presentación de datos ultrasonido convencional

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

En el ultrasonido arreglo de fases manual, la interpretación es más fácil pues ésta se presenta en un S-scan o scan sectorial que posicionando al transductor a una cierta distancia del eje de la soldadura permite realizar la inspección total de la cara del cordón de soldadura en el lado donde se encuentra ubicado el transductor eliminando así el movimiento de vaivén que se realiza en el ultrasonido convencional, por este motivo es muy probable que en el scan sectorial el eco de capa como el de raíz de la soldadura sean visibles, los ecos de discontinuidades se presentarán en del eje de la soldadura hacia la izquierda como se puede apreciar en la Figura 3-3. Estas indicaciones son más fáciles de visualizar por la forma como se representa el eco, esto hace que el tiempo de inspección sea más corto.

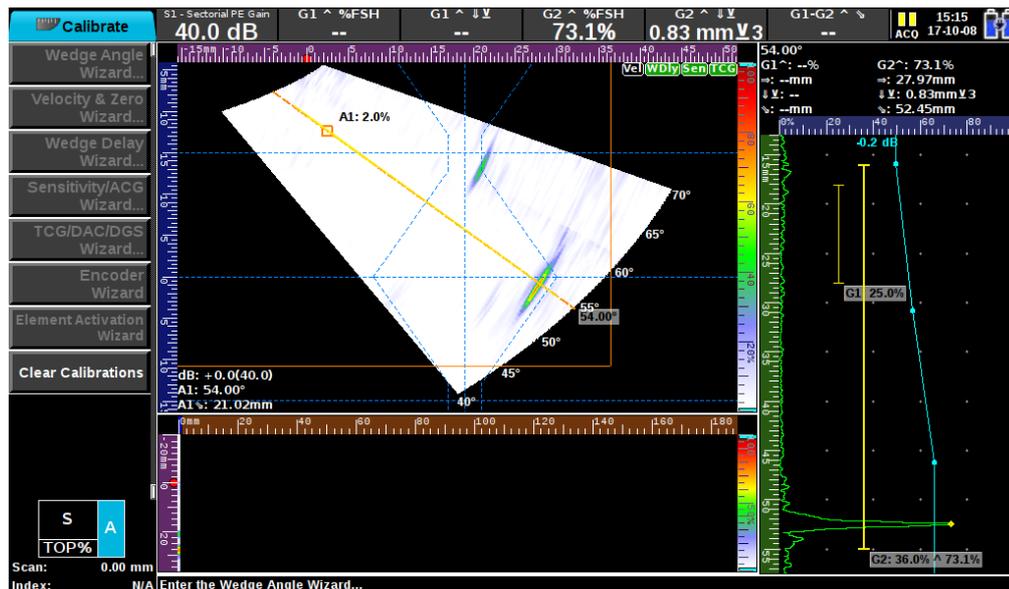


Figura 3-3: Presentación de datos ultrasonido arreglo de fases.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

La interpretación de los registros digitales es más cómoda, fiable y rápida por qué se los realiza en un ordenador, también cuenta con más Scans como el top view o el B scan que ayudan a discernir mejor cualquier discontinuidad en un tiempo menor.

Otra ventaja significativa que poseen las técnicas de ultrasonido semiautomático es el registro digital de la junta el cual ha permitido que las normas de construcción tomen a esta técnica como un reemplazo a la tradicional radiografía industrial bajo ciertos apéndices mandatorios que se debe acatar, este registro digital es perfectamente auditable y la puede revisar cualquier persona conocedora del tema, a diferencia del ultrasonido convencional o arreglo de fases manual que la inspección que da solo a criterio del examinador.

En la Figura 4-3 se puede apreciar una soldadura con discontinuidades, en la que se ha seccionado el archivo digital de la junta y se ha montado sobre las discontinuidades de la misma para poder realizar una comparación, las secciones se realizan a 45° obteniendo 8 secciones, la longitud de una soldadura para una tubería de 10 in cedula 80 corresponde a 857.81 mm por lo que una sección tiene una longitud de 107.23 mm; en la sección partiendo de 0 hasta 107.23mm, el registro digital capta la señal de una falta de fusión en el bisel dicha discontinuidad no está visible por esta razón no se muestra en la foto, aledaño se encuentra un poro pequeño, de 107.23 hasta 214.45 mm se evidencia la indicación de una falta de fusión entre pases, de 214.45 hasta 321.68 se evidencia socavaciones internas, escoria alineada y penetración incompleta respectivamente, en el proceso de apertura de la soldadura se eliminó la escoria alineada por tal efecto no se muestra, y se la puede apreciar en la Figura 17-3; de 321.68 hasta 536.15 es una

zona donde no se presenta discontinuidades estas zonas se crearon a propósito el momento de realizar las probetas para comprobar que el equipo no emita falsos positivos; desde 536.15 hasta 643.3 se puede visualizar dos discontinuidades volumétricas que son identificadas fácilmente con el ensayo; desde 643.3 hasta 750.6 se evidencia discontinuidades volumétricas y una lineal tipo falta de fusión entre pases que se aprecian en la corrida de ultrasonido; de 750.6 hasta 857.8 se aprecia una discontinuidad volumétrica tipo porosidad y discontinuidades lineales tipo falta de fusión entre pases los que son mostrados en el archivo digital de ultrasonido.

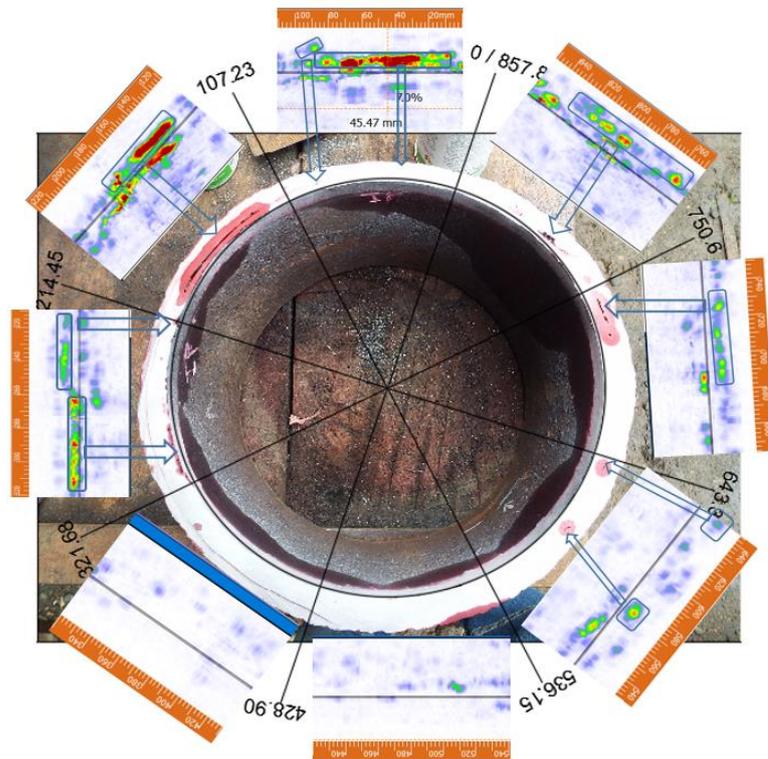


Figura 4-3: Seccionado de un archivo digital.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.



Figura 5-3: Escoria alineada.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

En la Figura 6-3 se puede apreciar el archivo digital de inspección mediante el ultrasonido arreglo de fases semiautomático y que corresponde a la soldadura de la Figura 5-3, en la que a simple vista se puede determinar las zonas donde se encuentran las discontinuidades y que puede ser auditada por un inspector.

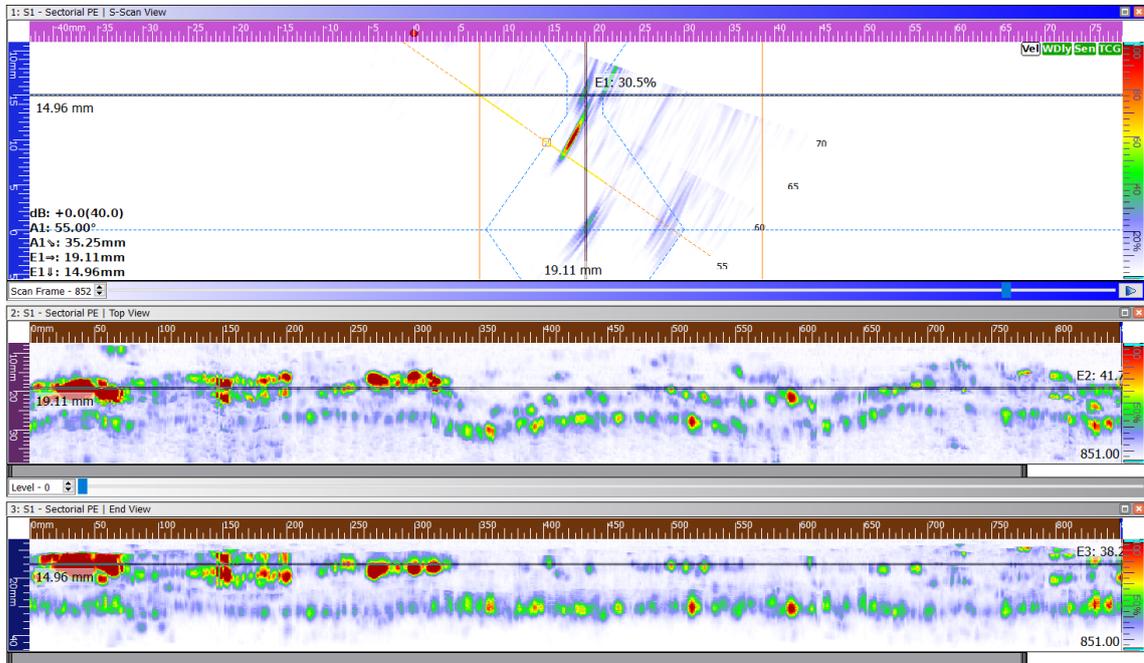


Figura 6-3: Archivo digital creado por SAUT.

Realizado por: Trujillo Manuel, 2021.

CONCLUSIONES

La técnica de inspección ultrasónica que mejor identifica y cuantifica las discontinuidades en juntas soldadas corresponde al ultrasonido arreglo de fases semiautomático que tuvo un 83% de probabilidad promedio en la detección discontinuidades.

En la inspección de las probetas de soldadura, se pudo identificar y cuantificar las discontinuidades más comunes citados en el código API 1104, sin embargo, en éste estudio no se pudo identificar las indicaciones de las discontinuidades: concavidad interna y quemadura transversal.

Analizando los resultados obtenidos de la inspección, se obtuvo una comparación entre las discontinuidades citadas en el código API 1104 con las indicaciones de ultrasonido, con lo que fue posible determinar los patrones característicos ocasionados por el haz ultrasónico reflejado de cada discontinuidad detectada, se obvia la técnica TOFD para el análisis debido a que ésta técnica tiene imágenes predefinidas para las diferentes discontinuidades.

La intensidad generada por el haz de ultrasonido reflejado, no indica el tamaño o la severidad de la discontinuidad, lo que representa es la cantidad de energía ultrasónica reflejada por la discontinuidad y depende del tipo de la misma.

En la elaboración de las probetas de soldadura con discontinuidades inducidas, resulta difícil obtenerlas de manera precisa en cuanto al tamaño, ubicación y tipo de imperfección, por esta razón no se pudo evaluar discontinuidades como fisuras transversales que son difíciles de obtener con el tipo de soldadura realizada.

Existe la posibilidad de que pequeñas discontinuidades puedan ser removidas en el proceso de ruptura de las probetas, éste error disminuirá la probabilidad de detección de las técnicas de ultrasonido, se evidenció que en pequeñas discontinuidades aisladas no se tenía una buena detección.

Por el principio de la técnica de ultrasonido pulso-eco convencional, no es factible identificar el tipo de discontinuidad presente en la soldadura, pero se puede ayudar del over line (geometría de la junta en el s scan) para poder tener un estimado del tipo de discontinuidad que puede ser en base a su ubicación y a la intensidad de rebote del haz.

RECOMENDACIONES

Se debe tener un control exacto del posicionamiento de transductor al centro de la soldadura, de ser posible se debe marcar una línea paralela al talón de la junta cuando esta se encuentra biselada con la distancia que debe separarse el transductor a fin de evitar que el momento de la inspección el transductor se aleje o se acerque mucho al cordón de la soldadura y por esto se de una mala interpretación de los ecos.

Una correcta interpretación de las indicaciones generadas por el haz ultrasónico, va a depender en gran parte de la experiencia que tenga el examinador, para ello es necesario contar con una capacitación y certificación.

Limpiar adecuadamente la zona en donde se va a movilizar el transductor con el fin de que no se cohíba el libre movimiento del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

Andreucci, R. *Ensaio por ultra-som*. São Paulo-Brasil: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 2006.

API SPECIFICATION 5L. *Specification for Line Pipe, 43rd Edition.*

API 1104. *Welding of Pipelines and Related Facilities, 21st Edition.*

AWS A3.0M/A3.0. *Standard Welding Terms and Definitions, 12th Edition.*

AWS A5.18/A5.18M. *Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding.*

AWS A5.5/A5.5M. *Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, 10th Edition.*

BARRERA SUÁREZ, Lizeth Paola, & CORONEL PICÓN, Martha Marcela. Desarrollo y procedimientos para la utilización de técnicas de ensayos no destructivos con ultrasonido para inspección de tuberías (Trabajo de titulación) [En línea]. Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Electrónica. Bucaramanga-Colombia. 2011. [Consulta: 2018-08-10]. Disponible en: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/1633>

CALERO RODRÍGUEZ, Oswaldo Leonardo. Ensayos destructivos y no destructivos y su efecto sobre la calidad de las tolvas para volquetas producidas por I.M.ESCO (Trabajo de titulación) [En línea]. Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Ingeniería Mecánica. Ambato-Ecuador. 2012. [Consulta: 2018-08-10]. Disponible en: <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/2097>

CAPOTE LUNA, Vicente. " Ensayos no destructivos en la soldadura ". *Temas para la Educación* [En línea], 2011, (España) (13). [Consulta: 20 Julio 2018]. ISSN 1989-4023. Disponible en: <https://www.feandalucia.ccoo.es/docuipdf.aspx?d=8259&s=>

CARRION VIRAMONTES, Francisco J; et al. "La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes". *Instituto Mexicano del Transporte* [En línea], 2003, (México) (231). [Consulta: 20 Julio 2018]. ISSN 0188-7297. Disponible en: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt231.pdf>

CASTILLO GONZÁLEZ, Sergio Andrés, & INOSTROZA HERNÁNDEZ, Matías Javier.

Ensayos no destructivos mediante ultrasonido en equipos térmicos (Trabajo de titulación) [En línea]. Universidad del Bío-Bío, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica. Concepción-Chile. 2013. [Consulta: 2018-08-10]. Disponible en: http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/798/1/Castillo_Gonzalez_Sergio.pdf

FLORES BARRERA, Leonel Gerardo.

Medición de espesores por ultrasonido y requisitos necesarios para el personal que lleva a cabo ensayos no destructivos en la central nucleoelectrica Laguna Verde (Trabajo de titulación) [En línea]. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México D.F.-México. 2009. [Consulta: 2018-08-10]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/3887/Binder57.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

GARCÍA MEDINA, Verónica.

Técnica no destructiva para el estudio de monumentos (Trabajo de titulación) [En línea]. Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Escuela Superior de Ingenieros. Sevilla-España. 2013. [Consulta: 2018-08-10]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20370/fichero/Proyecto+Final+cd.pdf>

JIMÉNEZ BENÍTEZ, Daniel, & BEJARANO OSORIO, Daniel.

Inspección de uniones soldadas mediante ensayo no destructivo de ultrasonido con el equipo VEO 16-64 SONATEST (Trabajo de titulación) [En línea]. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Mecánica, Programa de Ingeniería Mecánica. Pereira-Colombia. 2017. [Consulta: 2018-08-10]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/7695>

LÓPEZ LINA, Gerardo Patricio.

La inspección y evaluación no destructiva por el método de ultrasonido, en materiales y componentes, para el mantenimiento, la seguridad y la sustentabilidad de la infraestructura industrial (Trabajo de titulación) [En línea]. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México D.F.-México. 2009. [Consulta: 2018-08-10]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/5033/147.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

MARTÍNEZ SALINAS, Jesús.

Inspección y evaluación de discontinuidades en proceso de soldadura SAW mediante la técnica de ultrasonido con arreglo de fases (Trabajo de titulación) [En línea]. Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, División de Estudios de Post-Grado. Saltillo-México. 2009. [Consulta: 2018-08-10]. Disponible en: <http://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1022/287>

MOSQUERA ÁVILA, Paúl Fernando, & SÁNCHEZ ESPINOZA, Marcelo Francisco.

Detección de fallas superficiales e internas en tuberías de alta presión para motores estacionarios por el método de ultrasonido (Trabajo de titulación) [En línea]. Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz. Cuenca-Ecuador. 2015. [Consulta: 2018-08-10]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8947>

OSPINA LOPEZ, Ricaurte; et al. "Aplicación y selección de ensayos no destructivos para la

evaluación de uniones soldadas". *Scientia Et Technica* [en línea], 2011, (Ecuador) 2(48), pp. 196-201. [Consulta: 20 Julio 2018]. ISSN 0122-1701. Disponible en: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/1283/855>

RAMÓN GAMAS, Ángel Gerardo. Análisis de las técnicas no destructivas de ultrasonido y

radiografía industrial utilizadas en la fabricación de tuberías de acero API 5L X70 mediante el proceso de arco sumergido (Trabajo de titulación) [En línea]. Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, División de Estudios de Post-Grado. Saltillo-México. 2013. [Consulta: 2018-08-10]. Disponible en:

<http://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1022/223>

ROJAS RODRÍGUEZ, David Andrés. Desarrollo y elaboración del manual de

procedimientos de inspección para talleres aeronáuticos de reparación de ensayos no destructivos (Trabajo de titulación) [En línea]. Institución Universitaria Los Libertadores, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Aeronáutica. Bogotá-Colombia. 2016. [Consulta: 2018-08-10]. Disponible en:

<https://repository.libertadores.edu.co/bitstream/handle/11371/968/RojasRodr%C3%ADguezDavidAndr%C3%A9s.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

SANTIN, Jorge Luiz. *Ultra-Som: Técnica e Aplicação*. Curitiba-Brasil: Qualitymark, 1997.

SORIA LEMUS, Enrique Humberto. Laboratorio de ensayos no destructivos de la carrera de

Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería (Trabajo de titulación) [En línea]. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. Guatemala-Guatemala. 2004. [Consulta: 2018-08-10]. Disponible en:

http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0438_M.pdf

VARAS PÉREZ, Gabriel Sebastián. Aplicaciones y ensayos no destructivos con ultrasonido

en la industria. Casos prácticos utilizando equipo de medición EPOCH1000I (Trabajo de titulación) [En línea]. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería,

Escuela de Ingeniería Civil Acústica. Valdivia-Chile. 2013. [Consulta: 2018-08-10]. Disponible en:

<http://catalogobiblioteca.uach.cl:8080/ipac20/ipac.jsp?session=1U965588V22Y7.17557&profile=bibteja&uri=link=3100007~!186161~!3100001~!3100002&aspect=subtab14&menu=search&ri=4&source=~!biblioteca&term=Varas+P%C3%A9rez%2C+Gabriel+Sebasti%C3%A1n&index=AUTHOR>



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL
CHIMBORAZO**

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS
DEL APRENDIZAJE**



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 19/08/2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: MANUEL MESIAS TRUJILLO CASTILLO
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: MECÁNICA
Carrera: INGENIERÍA MECÁNICA
Título a optar: INGENIERO MECÁNICO
f. Analista de biblioteca responsable: